

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Механіко-машинобудівний інститут**

**Магістерська робота на тему:**  
**«Дослідження алмазного шліфування сферичних поверхонь з**  
**сапфіру та діоксиду цирконію»**

Виконав студент групи МТ-81МП  
А.К.

Тихоновський

Керівник дипломної роботи

Сохань С. В.

**Київ-2019**

УДК 621.9.025.77:615.46:616.728

Тихоновський, А.К. Дослідження алмазного шліфування сферичних поверхонь з сапфіру та діоксиду цирконію: магістерська дис. : 131 Прикладна механіка, Технології машинобудування / Тихоновський Артем Костянтинович. – Київ, 2019. – 49 с.

## Вступ

## РЕФЕРАТ

**Структура та об'єм роботи.** У магістерську дисертацію входить вступ, 5 розділів, загальні висновки, список використаної літератури. Робота складається з 00 сторінок тексту, 00 таблиці, 00 рисунків, 00 літературних джерел.

**Актуальність теми.** Ендопротезування суглобів є ефективним і часто єдиним способом відновлення втраченої функції кінцівки. Статистика різних країн світу свідчить, що в середньому щорічно в протезуванні потребують 500-1000 хворих і травмованих на 1 млн населення. В світі кожен рік виконується встановлення понад одного мільйона тазостегнових і понад півмільйона колінних ендопротезів. На сучасному етапі розвитку медичної техніки зростає попит на вироби з високоякісних матеріалів, для яких точність виготовлення і якість поверхні є ключовими факторами, що визначають тривалість їхнього терміну служби. Зважаючи на велику різноманітність форм і розмірів таких виробів, а також часто порівняно невеликі обсяги випуску, для їх виробництва найкраще підходять високоточні механообробні центри, які можуть виконувати складні технологічні переходи і в той же час мають високу гнучкість переналагодження. Для отримання прецизійних виробів з сапфіру, полікристалічного діоксиду цирконію застосовують алмазне шліфування.

**Мета й завдання дослідження.** Дослідити ефективність алмазного шліфування сферичної поверхні сапфіру й полікристалічного діоксиду

цирконію інструментом на полімерній зв'язці зі зниженим розкидом поруватих включень зв'язки за розмірами.

**Об'єкт дослідження.** Алмазне шліфування сферичних поверхонь з сапфіру та діоксиду цирконію.

**Предмет дослідження.** Ефективність алмазного шліфування сферичної поверхні сапфіру й полікристалічного діоксиду цирконію інструментом на полімерній зв'язці зі зниженим розкидом поруватих включень зв'язки за розмірами.

**Методи дослідження.** Аналіз раніше опублікованих робіт. Проведення експериментів.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В умовах тертя інструментального композиту на полімерній зв'язці зі зниженим розкидом поруватих включень зв'язки за розмірами по діоксиду цирконію в 3 рази знижується амплітуда коливань коефіцієнту тертя в порівнянні з тертям по сапфіру. Крім того на відміну від шліфування діоксиду цирконію на шліфованій поверхні сапфіру спостерігаються виколування, для виключення яких доцільно зменшувати величину поруватих включень зв'язки.

**Практичне значення отриманих результатів.** Показано, що шорсткість поверхні полікристалічного діоксиду цирконію при його тонкому шліфуванні в цілому в 4-5 разів нижче, ніж у сапфіра. Кількісна оцінка висотних параметрів шорсткості поверхні діоксиду цирконію засвідчила недоцільність застосування операції подальшого алмазного доведення поверхні. Якість поверхні сапфіру при його тонкому шліфуванні не є достатньою для виключення операції подальшого алмазного доведення поверхні.

**Апробація результатів дисертації та публікації.** Матеріали дисертації було представлено на науковій конференції «Інновації молоді в машинобудуванні», на основі результатів цієї конференції робота була опублікована в збірці праць «Міжнародної науково-технічної конференції

молодих вчених та студентів» / за заг. ред. Данильченка Ю.М., д-ра техн. наук., проф. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – № 1. – 443 с. – С. 387-392.

**Ключові слова.** : алмазне шліфування, сапфір, полікристалічний діоксид цирконію, сферична поверхня, інструментальний композит, розподіл поруватих включень, шорсткість поверхні

Зміст	
Вступ .....	2
<b>Розділ 1. СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Технології отримання сферичних поверхонь з сапфіру та     оксиду цирконію.....</b>	<b>6</b>
Формування точної сферичної поверхні методами алмазної обробки .....	6
Особливості технології шліфування та полірування прецизійних поверхонь.....	10
Інструмент для фінішної обробки прецизійних поверхонь .....	11
Методи контролю порушеного шару .....	13
Вплив зовнішніх факторів на знос поверхонь тертя .....	14
<b>2.1 Технологія виготовлення шарнірної пари тазостегнового     ендопротеза на багатофункціональному стенді для прецизійної     алмазної обробки.....</b>	<b>16</b>
<b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>	<b>26</b>
<b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>35</b>
<b>РОЗДІЛ 4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....</b>	<b>39</b>
<b>РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....</b>	<b>40</b>
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>52</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>53</b>

## **Розділ 1. СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ**

### **1.1 Технології отримання сферичних поверхонь з сапфіру та оксиду цирконію**

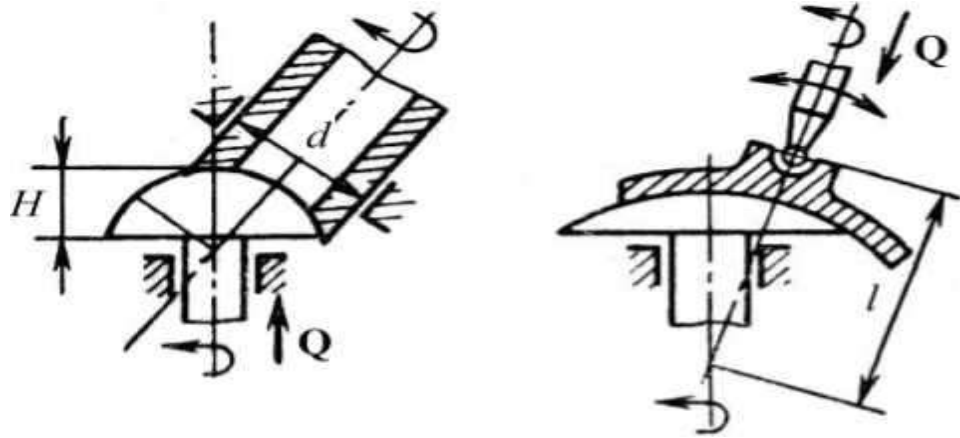
Конструкційна кераміка і штучний сапфір - це важкооброблювані матеріали, для яких практично єдиним методом отримання прецизійної поверхні головки ендопротеза є її обробка з використанням виключно алмазного інструменту.

Формування точної сферичної поверхні методами алмазної обробки

З точки зору отримання прецизійної поверхні механічною обробкою головка ендопротеза є виробом типу «усічений куля» висотою 0,85-0,90 його діаметра з глухим осесиметричним отвором. Таким чином, потрібно вирішити задачу розробки процесу алмазного доведення виробів типу «усічений куля» з кераміки медичного призначення та штучного сапфіра із забезпеченням їх несферичності менше 1 мкм.

На сучасному етапі формування точної сферичної поверхні виробів з важкооброблюваних матеріалів механічною обробкою забезпечують двома принципово різними методами алмазної обробки: прецизійним алмазним шліфуванням трубчастим інструментом по методу «жорстких осей» [742-746], або алмазним доведенням і поліруванням сферичної поверхні за методом вільного притирання ( вільної притирання) [742, 744-750].

Відповідно, використовувані інструменти мають торцеву поверхню двох типів: вузьку кільцеву і сферичну (рис. 5.1).



Схеми алмазної обробки: за методом жорстких осей (а) і вільного притирання (б).

У технології виготовлення оптичних деталей вибір методу фінішної обробки залежить від вимог, що пред'являються до прецизійним сферичних поверхнях. Для формоутворення сферичних поверхонь низькою точності із загальним відхиленням форми більше 5 довжин світлової хвилі ( $> 1,25 \text{ мкм}$ ) їх тонке шліфування випоєняють за методом жорстких осей. Для формоутворення сферичних поверхонь середньої і високої точності із загальним відхиленням форми  $N < 1-4$  довжини світлової хвилі (відповідно  $1,00 \text{ мкм} < 5 < 0,25 \text{ мкм}$  і  $5 < 0,25 \text{ мкм}$ ) і місцевим  $< 0,1$  довжини світлової хвилі, шорсткістю поверхні  $K_a < 0,01 \text{ мкм}$  використовують метод вільного притирання [742, 744-746].

Метод жорстких осей заснований на геометричному замиканні кінематичних ланцюгів виробу та інструменту, т. Е. Точність шліфування залежить від точності позиціювання інструменту щодо виробу [742, 744-746]. Для такої обробки явище взаємного притирання поверхонь інструменту і виробу відіграє незначну роль. Формування сферичної поверхні забезпечує геометрія просторового перетину двох тіл - трубчастого інструменту з вузькою кільцевої торцевої поверхнею і виробу. Обидва тіла жорстко пов'язані з осями обертання, які лежать в одній ПЛОЩИНІ і перетинаються під деяким кутом  $\alpha$ . При обертанні цих тіл і переміщенні інструменту ВДОЛЬ його осі в сторону виробу кромка інструменту вирізає в тілі виробу поверхню, всі точки якої лежать на окружності, утвореної обертанням

інструменту, і одночасно ті ж точки утворюють тіло обертання щодо осі виробу.

Точність формоутворення за методом жорстких осей залежить від точності руху виконавчих ланок верстата, яка зазвичай недостатньо висока. У зв'язку з цим в оптичній промисловості такий процес обробки використовують ТІЛЬКИ ДЛЯ тонкого шліфування поверхонь низькою точності. Метод реалізується в роботі попередньо настроюються верстатів моделей «Алмаз», АЛ і А0С [751, 752] в напівавтоматичному або автоматичному циклі. При виборі режиму обробки окружні швидкості інструменту призначають в межах 20-35 м / с при обертанні оброблюваного іздеїя з частотою 500-1000 об / хв.

Для отримання поверхонь більш високої точності методом «жорстких осей» потрібні спеціальне сферошліфувальное обладнання та постійний контроль і правка профілю інструменту, який до того ж має забезпечувати необхідну якість обробленої поверхні  $K_a = 0,020 - 0,010$  мкм, і немінучі значні фінансові витрати.

Інший метод обробки, на якому засновані процеси алмазного доведення, точного полірування - це метод вільного притирання (вільної притирання). Він передбачає силове замикання кінематичних ланцюгів виробу та інструменту-притиру і вільну самоустановку притиру на виробі [742, 744-747]. Формування точної сферичної поверхні відбувається при одночасному обертанні виробу і пружно притискається до нього кільцевого притиру, вісь якого проходить через вісь обертання виробу і нахилена до осі утвореною сфери під кутом, за рахунок взаємної притирання їх поверхонь [742, 744-746]. Шарнірне кріплення притиру забезпечує вільну самоустановку його увігнутою робочої поверхні на виробі з контактом безпосередньо або через абразивну прошарок. Через кутового розташування осей обертання не потрібно примусового обертання притиру.

Метод вільної притирання використовують для отримання сферичних поверхонь середньої і високої точності на верстатах, що забезпечують



окружні швидкості інструменту 8-20 м / с і питомі тиску 15-20 кПа. Як правило, використовується відносно нескладне універсальне обладнання, наприклад, для виробництва оптичних деталей - верстати типу ШП (Шліфувально- полірувальні) або ПД (полирувально-доводочніє).

Однак в цьому випадку вимагає вирішення завдання повторюваності результатів обробки через нестабільність форми притиру в результаті його зносу при обробці кожного виробу, яка вирішується лише за рахунок постійного управління процесом обробки з контролем форми і розмірів тим частіше, чим вище досягнута точність виробу. Тому неминучим є залучення висококваліфікованих робітників-операторів, здатних регулярно виконувати контроль форми виробу.

Іншою не менш важливою проблемою, яка виникає у зв'язку з необхідністю алмазного доведення виробів типу «усічений куля» з кераміки і сапфіра, є неможливість їх виготовлення на обладнанні, що звично використовуються в оптичній промисловості і забезпечує обробку сферичної поверхні висотою лише трохи більшою її радіусу.

З позиції вибору методу фінішної алмазної обробки деталі типу «усічений куля» з кераміки або сапфіру займають проміжне місце між оптичними деталями, що мають сферичну поверхню, і керамічними кульками.

Однак в оптиці немає необхідності виготовляти сферичні вироби, висота яких становить 0,85-0,90 їх діаметра і, відповідно, технологічне обладнання в оптичному виробництві не забезпечує прецизійну обробку таких деталей.

Технологія групової доведення керамічних куль між двома дисками забезпечує точність і відхилення форми менше 0,3 мкм і шорсткість поверхні  $R_a = 0,30-0,08$  мкм [753]. Проте, наявність наскрізного або глухого вихідного осесиметричного отвори вимагає застосування спеціальних заглушок з того ж матеріалу, істотно ускладнюючи технологію групової доведення і ускладнюючи отримання таких показників з використанням цього методу

обробки. Отримання глухого осесимметричного отвори в кулі, наприклад, зі штучного сапфіра, після остаточного доведення його поверхні також пов'язане з певними технологічними труднощами через небезпеку утворення кільцевих або поздовжніх тріщин навколо отвору при його алмазному свердлінні і видаленні керна.

Особливості технології шліфування та полірування прецизійних поверхонь

При масовому виготовленні прецизійних деталей, коли рела значення набуває розмірна стійкість інструменту, сучасна тенденція їх фінішної обробки полягає у відмові від процесів обробки вільним абразивом і заміні їх переважно одностадійної обробкою із застосуванням інструменту з закріпленими зернами алмазу або інструменту з оксидів рідкоземельних металів [748, 754 -757]. Алмазний інструмент для тонкого шліфування має алмазоносний шар, який утворює поверхню плоскою або сферичної форми. В [750, 757-759] викладено методи спеціального розрахунку сферичного алмазного інструменту, оснащеного алмазними таблетками, і способи його виготовлення. Після складання поверхню інструменту прошліфовивають абразивним порошком на металевому правлячому інструменті відповідної форми до розкриття алмазоносного шару і надання робочої поверхні необхідної точності.

Значний внесок у розробку теорії і практики процесів полірування неметалічних матеріалів внесений співробітниками ІСМ НАН України. Порівняно недавно В. В. Роговим висунута трибохімічних концепція механізму полірування кремнийсодержащих матеріалів і зношування полірувального інструменту, згідно з якою заключна стадія обробки поверхні поліруванням являє собою сукупність кількох видів зношування [760, 761]. При цьому домінуючим є поверхневе утомлююча руйнування, при якому видалення частинок зносу відбувається через накопичення дефектів і ослаблення поверхневого шару виробу. Філатовим Ю. Д. висунута кластерна теорія і механізм полірування кремнийсодержащих матеріалів, засновані на

кластерному поданні про структуру оброблюваного матеріалу і полірувального інструменту [762, 763]. Нова технологія фінішної обробки прецизійних плоских поверхонь деталей оптичних систем і мікроелектроніки з сапфіра дозволяє досягати показників шорсткості  $R_a = 0,38-0,17$  нм [764, 765]. У роботах В. І. Сидорко і Ю. Д. Філатова розроблена модель освіти і спрямованого видалення частинок оброблюваного матеріалу і формування високоякісної поверхні при фінішній обробці природного і штучного каменю з урахуванням особливостей масопереносу в зоні контакту і статистичного характеру розподілу часток шламу за розмірами [766 –769]. Показано, що стан поверхні робочого шару інструменту періодично змінюється в процесі полірування внаслідок утворення часток зносу, їх локалізації на контактуючих поверхнях у вигляді шарів нальоту і видалення з СОТС.

#### Інструмент для фінішної обробки прецизійних поверхонь

Найважливіша роль в процесі формоутворення прецизійних поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів належить абразивного (алмазному) матеріалу та інструментів на його основі, бо останні визначають не тільки продуктивність процесу, а й шорсткість поверхні, мікроструктуру порушеного шару виробу. Оптимальне поєднання таких характеристик, як міцність, зерновий склад, хімічна активність набуває вирішального значення [743-745]. Для шліфування важкооброблюваних матеріалів застосовують порошки, зерна яких в порівнянні з оброблюваним матеріалом мають велику твердість. До таких абразивних матеріалів відносяться, перш за все, зерна алмазу, карборунда, корунду, наждаку і кварцу. Порошок цих матеріалів мають абразивні властивості, т. Е. При розколюванні утворюють більш дрібні частинки, які мають такі ж гострі грані. Як правило, зерна мають пірамідальну огранювання з гострими вершинами, в якій найбільший розмір відноситься до найменшого приблизно як 2: 1.

У зв'язку з появою надтвердих матеріалів (ВТМ) - синтетичного алмазу, кубічного нітриду бору і ряду інших інструментальних матеріалів, в технологічних прийомах формоутворення прецизійних поверхонь настав корінний перелом, оскільки виявилася можливою суттєвої стабілізації абразивних властивостей абразивних та полірування елементів [743-745, 748, 755, 764, 765]. Ардамацкім А. С. встановлено [743], що диспергуюча здатність закріплених зерен на 3-4 порядки вище, ніж вільних. Якщо при шліфуванні вільним абразивом глибина порушеного шару визначається номером його зернистості, то при використанні закріпленого алмазу глибина порушеного шару знижується в квадратичної залежності [745]. Відомо також, що на шорсткість і глибину порушеного шару впливають коефіцієнт ізометричності, кути загострення виступів і радіуси заокруглення абразивних зерен [770], їх мікротвердість та міцність [771] - при обробці абразивами у вільному стані, алмазоудержаніє і концентрація зерен в робочому шарі [758] - при обробці пов'язаним абразивом. З метою оптимізації процесів шліфування мінералокераміки автори [772, 773] проаналізували вплив методів правки шліфувальних кругів, режимів шліфування (швидкість різання, подача, припуск на обробку) і характеристик інструментів із зв'язаним абразивом (зернистість, концентрація зерен, тип зерен, вид зв'язки) на точність форми і розмірів, шорсткість оброблюваних поверхонь і фізико-механічний стан поверхневого шару виробу. У самий останній час вплив фізико-механічних властивостей абразивного матеріалу на його експлуатаційні показники досліджено в [774], зміна геометричних параметрів зерен в процесі зношування описано в [775].

Обробка інструментами з закріпленими абразивними зернами є найбільш ефективним процесом в технології виготовлення прецизійних деталей з кераміки. Її ефективність особливо збільшується із застосуванням в таких інструментах природних і синтетичних алмазів [743-745, 748, 750, 753, 755, 756, 760, 764, 766]. Такі інструменти для обробки прецизійних деталей випускаються на металевих, органічних, керамічних і еластичних

(каучукових) зв'язках з концентрацією алмазів від 25 до 100% для попередніх операцій обробки і від 5 до 25% для тонкого і надтонкого алмазного шліфування. Для тонкого шліфування прецизійних деталей зазвичай використовують металеві зв'язки, а зернистість мікропорошку СТМ вибирають в межах від 40/28 до 10/7 [743-745, 748, 755, 765]. При доведенні і поліруванні використовують також і різні органічні зв'язки, а зернистість мікропорошку СТМ вибирають в межах від 10/7 до 0,5 / 0,1 [743-745, 748, 755, 764. 765]. Концентрацію мікропорошку СТМ вибирають в межах від 25 до 6% [743-745, 748, 764].

#### Методи контролю порушеного шару

Розробка технологічних процесів механічної обробки деталей з важкооброблюваних матеріалів і вибір посієдовательності операцій і переходів визначаються геометричною точністю деталей і допустимою глибиною порушеного шару.

На сьогоднішній день за різноманітністю методик, спектру контрольованих фізико-хімічних параметрів, просторового і силового поділу, а також по можливості контролю локальних областей об'єктів сканирующая зондовая мікроскопія (СЗМ), включаючи атомно-силову мікроскопію (АТСМ) є найбільш інтенсивно розвивається областю досліджень [777 –780]. Це метод дослідження поверхонь з субнанометровою і навіть субангстремною роздільною здатністю. Оскільки СЗМ-картографування висот поверхні проводиться на підставі прямих вимірювань (на відміну від оптичної та електронної мікроскопії), подальша цифрова обробка таких даних дозволяє виконати кількісний і якісний аналіз різних характеристик досліджуваної поверхні [778].

В [777, 779, 780] для аналізу шорсткості і локальної структури поверхні різних матеріалів дано обґрунтування системи метричних (амплітудних, функціональних і просторових) і фрактальних параметрів СЗМ, багато з яких є міжнародними стандартами і визначені в термінах класичної статистики, спектрального аналізу та фрактальної геометрії.

## Вплив зовнішніх факторів на знос поверхонь тертя

Зношування є багатофакторним процесом, тому знос визначається сукупністю реалізуються на поверхні тертя зовнішніх умов [800, 802]. До них відносяться вид і характер тертя; швидкість ковзання, зміна її величини; навантаження пари, що треться (нормальна, дотична); характер дії навантаження (статична, динамічна, циклічна і т. д.); температурні чинники - об'ємна і контактна температура, градієнт температури; конфігурація, що труться, що обумовлюють рівномірний або нерівномірний розподіл контактного тиску (питомих сил тертя); розміри і форма поверхонь тертя, що визначають інтенсивність охолодження; початковий і сталий мікрорельєф, що труться, наявність макроотклоненій профілю; властивості наявних на поверхні тертя плівок і інші фактори. Знос також залежить від поєднання труться матеріалів, їх фізико-механічних, фізичних, хімічних, фрикційних властивостей. Причому внаслідок складних механічних, фізичних, хімічних, термічних процесів, що відбуваються в зоні тертя, ці властивості в процесі тертя можуть істотно відрізнятися від вихідних. Для оцінки величини зносу елементів пари, що треться при дослідженні кінетики зношування необхідно розташовувати загальними закономірностями впливу окремих зовнішніх параметрів процесу або їх сукупності на характеристики зносу.

Вид тертя істотно впливає на знос і на механізми кінетики зношування матеріалів. Великим обсягом досліджень [802] підтверджена усталостная концепція зношування. Втомні пошкодження, що призводять до зносу матеріалу, виникають при різній кількості циклів напружень в залежності від характеру силового взаємодії поверхонь, що труться. Для однієї і тієї ж пари матеріалів в залежності від внелніх умов інтенсивність зношування може змінюватися на 12 порядків. Істотний вплив на зносостійкість тертьових матеріалів надає наявність в зоні тертя різних мастил, абразивних або зміцнених частинок різного походження. У першому випадку можливе значне зменшення зносу внаслідок збільшення числа циклів до відділення продуктів зносу або навіть його припинення (ефект безизносності). У

другому випадку спостерігається різке збільшення зносу внаслідок інтенсивного передеформірування (пропахівання, мікрорізання) матеріалу частками і тим самим зменшення числа циклів впливу. При різних видах тертя втомні процеси можуть превалювати над іншими механізмами фрикційного руйнування матеріалів АБО надавати допоміжний вплив.

Певний вплив на величину зносу надає характер переміщення. Переміщення труться теє може бути поступальним (прямолінійним, криволінійним) або зворотно-поступальним. При цьому картина силового взаємодії мікровиступів неоднакова. У першому випадку мікронерівності піддаються впливу пульсуючого напруги, у другому - знакозмінного напруги, більш несприятливо впливає на міцність від втоми матеріалу.

Характер прикладеного навантаження впливає на зносостійкість пари, що треться. За інших рівних умов найбільш стабільний процес зношування при статичному навантаженні. За результатами узагальнення даних досліджень встановлено, що при монотонному збільшенні нормального навантаження спостерігається зміна зносу стрибком. Динамічна навантаження призводить до підвищенню термічних напружень, проявляється інші небажані ефекти імпульсного навантаження. При циклічному навантаженні зростає роль втомних процесів.

Вплив шорсткості поверхні на знос неоднозначно. Для трибо-сполучень характерна наявність сталої АБО рівноважної шорсткості, що не залежить від початкової. Її параметри залежать від зовнішніх умов тертя. Результати іссєєдованій показують, що знос зменшується з умень-ням висоти мікронерівностей. При наявності хвилястими або інших макроотклоненій поверхні зростають контактні тиску і температура, що призводить до збільшення зносу.

При дослідженні впливу температури на знос встановлено, що вирішальну роль грає не об'ємна, а контактна температура. Вплив температури на знос фактично таке ж, як і швидкості ковзання. При певних температурах спостерігається мінімальний знос, який збільшується з

подальшим зростанням температури. При надмірному нагріванні може статися розм'якшення деформуються обсягів матеріалу і їх пластична деформація, знос різко збільшується і стає катастрофічним.

Відзначається, що на знос впливає і коефіцієнт тертя. У загальному випадку з його підвищенням при сталості інших умов тертя знос також збільшується, що можна пояснити зростанням питомих сил тертя, хоча тиску в контакті залишаються постійними.

Фактор, що впливає на величину зносу - форма дотичних поверхонь. Пара тертя може контактувати з поверхні (плоскою або криволінійною), лінії або малої майданчику, в точці. У випадку плоскої поверхні після завершення процесу підробітки тиску стають практично однорідними по всій номінальній площі контакту. Для таких поверхонь коефіцієнт взаємного перекриття досить великий, що забезпечує однакове нагрівання і тепловіддачу тіл, що труться. Для інших випадків розподіл тисків по області контакту неоднорідне протягом усього періоду зношування. Також може змінюватися їх початковий рівень внаслідок перерозподілу через зношування. У таких сполученнях знос є функцією координати точки зносу і часу. Тут  $K \neq 0$ , що створює умови нерівномірного розподілу теплоти тертя по поверхні тел. Всі ці фактори роблять несприятливий вплив на зношування тел в порівнянні з зносом поверхонь, на яких тиск є однорідним.

## **2.1 Технологія виготовлення шарнірної пари тазостегнового ендопротеза на багатофункціональному стенді для прецизійної алмазної обробки**

Для виготовлення компонентів шарнірної пари типу «сапфір-кераміка» тазостегнового ендопротеза довгострокового (30-40 років) використання в ІСМ розроблені технології прецизійної алмазної обробки, які використовують можливості багатофункціонального 4-координатного стенду з числовим програмним управлінням (ЧПУ), виготовленого компанією «Мікрон» (м.Одеса) за технічним завданням ІСМ.



У зазначеній шарнірній парі використовується вклядш ацетабулярного чаші з сапфіра ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) і головка шарнірної пари з кераміки на основі діоксиду цирконію ( $\text{ZrO}_2$ ) з добавкою оксиду ітрію (не більше 3,0%) для стабілізації фазового складу.

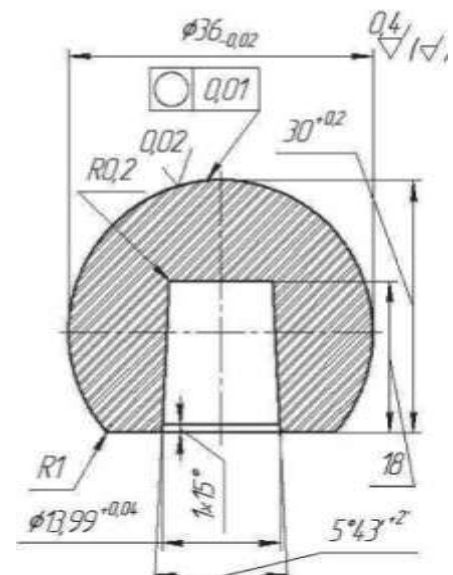
Технологія виготовлення шарнірних пар зазначеного типу включає технології виготовлення окремих компонентів шарнірної пари, а саме, головки шарнірної пари з кераміки на основі діоксиду цирконію і вклядиша ацетабулярного чаші з сапфіра.

Згідно з вимогами робочого креслення головки шарнірної пари з кераміки (рис. 9.1), потрібно забезпечити точність розміру, форми і шорсткість двох функціональних поверхонь: прецизійної сферичної, яка є однією з поверхонь шарнірної пари - охоплюється, а також прецизійної конусної поверхні посадочного отвору, який виконує функцію бази для приєднання головки до стегової ніжці.

Від правильної побудови технологічного маршруту залежать точність і трудомісткість алмазної обробки головки шарнірної пари. Як видно на рис. 9.2 (див. Кольорові іл.), Форма керамічної заготовки ДЛЯ виготовлення головки може бути як далекої від сферичної, так і максимально наближеною до сфери (рис. 9.3, див. Кольорові іл.).

Тому на першому етапі технологія алмазної обробки керамічної головки повинна передбачати виготовлення технологічної бази ДЛЯ подальшого закріплення заготовки при виконанні попереднього алмазного сферо шліфування.

Таким чином, маршрут алмазної обробки керамічної головки складається, як мінімум, з таких технологічних операцій:



- алмазне шліфування конусного отвору, фаски, торця головки для подальшого базування;
- попереднє діамантове сферо шліфування керамічної головки з припуском під подальшу фінішну обробку, який становить 0,05-0,10 мм (на діаметр);
- фінішне діамантове сферо шліфування керамічної головки із забезпеченням вимог стандарту 180 7602-2.

Для операції алмазного шліфування конусного отвору, фаски, торця головки на внутрішньошліфувальних верстатах (рис. 9.4, див. Кольорові іл.) В якості технологічної бази використовується зовнішня поверхня заготовки після спікання. При цій операції забезпечуються вимоги по точності діаметру, кута конуса отвори, кута і ширини фаски.

Для операції алмазного сферошліфування керамічної головки обрана технологічна схема алмазної обробки сферичної поверхні, яка орієнтована на технологічні можливості експериментального багатофункціонального 4-координатного станку. Цей станок спроектований для формоутворення і Фінішної обробки ввєнїх (для головок шарнірної пари) і внутрішніх (для вкладишів ацетабулярного чаш) функціональних сферичних поверхонь ендопротеза кульшового суглоба з металевих або неметалевих матеріалів розміром до 70 мм із забезпеченням необхідних показників точності, шорсткості поверхні  $R_a = 0,020 - 0,010$  мкм.

Станд виготовлений на базі горизонтально-фрезерного верстата з контурною системою ЧПУ і укомплектованого керованим поворотним столом, на якому розміщена додаткова шпиндельная бабка для закріплення оброблюваної деталі або інструмента (рис. 9.5, див. Кольорові іл.).

Технологічна схема обробки є однаковою як для формоо-бразованія, так і для фінішної обробки сферичної поверхні головки шарнірної пари. Вона заснована не на силовому, а на геометричному замиканні пари інструмент-поверхня. Вимоги по точності розміру, форми і шорсткості поверхні парових шарнірної пари.

деталь і передбачає використання кільцевого алмазного інструменту (рис. 9.6, див. Кольорові іл.) І послідовне чергування його подачі на врізання і зворотно-коливальної подачі уздовж оброблюваної поверхні (рис. 9.7, см. кольорові іл.). Перевага такої схеми полягає в точному позиціонуванні алмазного інструменту щодо оброблюваної поверхні, яке забезпечує досягнення потрібного радіусу сферичної поверхні з високою точністю, при якій від- відхилень від сферичності вимірюється частками мікрометра.

Таким чином, при операції алмазного сферошліфування забезпечуються вимоги по точності діаметру головки, шорсткості полірованої поверхні і відхилення від сферичності менше 1 мкм.

Згідно з вимогами робочого креслення вкладиша ацетабулярного чаші з сапфіра (рис. 9.8), потрібно забезпечити точність розміру, форми і шорсткості двох функціональних поверхонь: прецизійної сферичної (що охоплює), а також прецизійної конусної, яка виконує функцію бази для приєднання вкладиша до ацетабулярного чаші, а також плоскою торцевою.

Форма заготовки з сапфіра для виготовлення вкладиша ацетабулярного чаші може бути циліндричної, як показано на рис. 9.3, або кубічної.

Тому на першому етапі технологія алмазної обробки вкладиша повинна передбачати виготовлення технологічної бази для подальшого базування заготовки при попередньому алмазному шліфуванні зовнішніх поверхонь вкладиша.

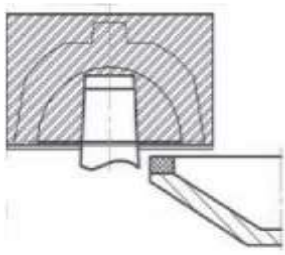


технологічної бази використовується зовнішня поверхня заготовки, а також забезпечуються вимоги по точності діаметру, кута конуса отвори, кута і ширини фаски.

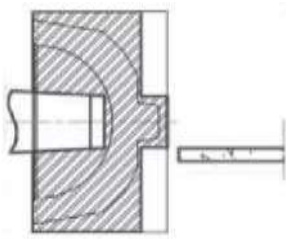
Послідовність переходів по формоутворення під час операцій попереднього алмазного шліфування зовнішніх поверхонь вкладиша з припуском під подальшу фінішну обробку приведена в табл. 9.2.

Технологічний маршрут попередньої алмазної обробки вкладиша з сапфіра

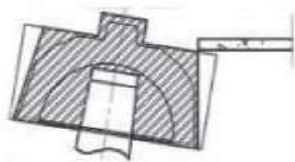
Схема  
формоутворення



Формоутворення торцевої поверхні фінішним шліфуванням чашковим алмазним кругом



Попереднє формоутворення виступу шліфуванням дисковим алмазним кругом



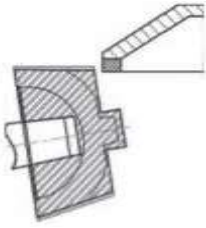
Попереднє формоутворення зовнішньої конусної поверхні шліфуванням дисковим алмазним кругом

Послідовність переходів по фінішному алмазному шліфуванню зовнішніх поверхонь вкладиша приведена в табл. 9.3, а на рис. 9.10, (див.

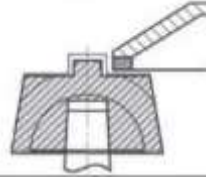
Кольорові іл.) Показано фінішне шліфування чашковим алмазним кругом зовнішньої конусної поверхні і фаски на конусної поверхні виступу.

Для базування вкладиша під час формоутворення внутрішньої сферичної поверхні була розроблена спеціальна технологічне оснащення (рис. 9.11).

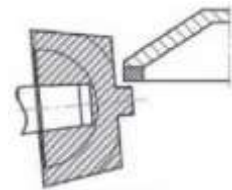
Технологічна схема обробки є однаковою як для формоутворення, так і для фінішної обробки внутрішньої сферичної поверхні вкладиша і передбачає використання кільцевого алмазного інструменту (рис. 9.12), а також послідовне чергування його подачі на врізання і зворотно-коливальної подачі уздовж оброблюваної поверхні.



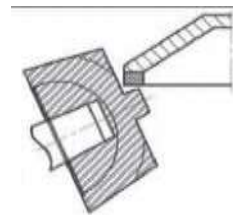
Фінішне шліфування чашковим алмазним кругом зовнішньої конусної поверхні



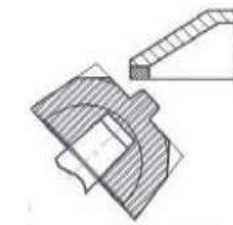
Фінішне шліфування чашковим алмазним кругом торцевої поверхні, суміжній з виступом



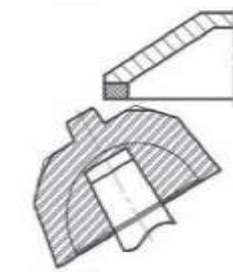
Фінішне шліфування чашковим алмазним кругом конусної поверхні виступу



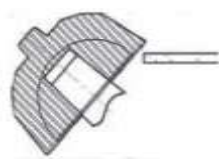
Фінішне шліфування чашковим алмазним кругом фаски на конусної поверхні виступу



Фінішне шліфування чашковим алмазним кругом першої перехідної конусної поверхні



Фінішне шліфування чашковим алмазним кругом другої перехідної конусної поверхні



Фінішне шліфування дисковим алмазним кругом фаски на конусної поверхні

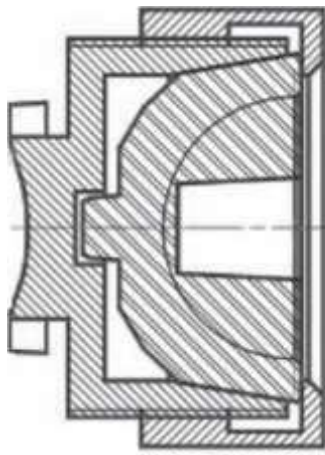


Рис. 9.11. Схема

спеціального

інструмент

для

шліфування

технологічного



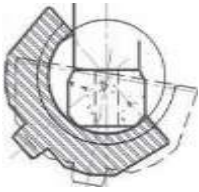
Рис. 9.12. Кільцевий алмазний

Послідовність переходів по формоутворення при операції попереднього алмазного шліфування внутрішньої сферичної поверхні вкладиша з припуском під подальшу фінішну обробку, а також схеми фінішної обробки наведені в табл. 9.4.

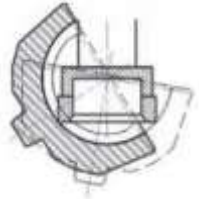
Таким чином, на операції алмазного сферошліфування забезпечуються вимоги по точності діаметру внутрішньої сферичної поверхні вкладиша, шорсткості полірованої поверхні і відхилення від сферичності.

За описаною технологією з використанням технологічних можливостей експериментального багатofункціонального 4-координатного станку з ЧПУ в ІСМ виготовлені дослідні зразки шарнірних пар Ø 36 мм типу «сапфір-кераміка» для використання в тазостегнових ендопротезах як імпортного, так і вітчизняного виробництва, наприклад системи «Іто-Мотор -С1ч» (рис. 9.13, 9.14, див. кольорові іл.).

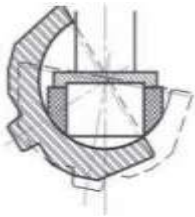




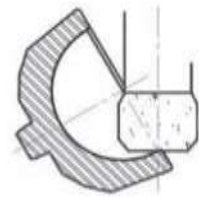
Формоутворення частини внутрішньої сферичної поверхні шліфуванням торцевих алмазним кругом



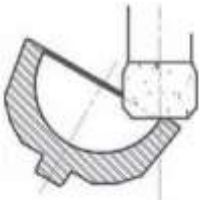
Формоутворення внутрішньої сферичної поверхні шліфуванням торцевих алмазним кругом



Фінішне шліфування внутрішньої сферичної поверхні торця алмазним кругом



Фінішне шліфування першої фаски на внутрішній сферичної поверхні торця алмазним кругом



Фінішне шліфування другий фаски на внутрішній сферичної поверхні торця алмазним кругом

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Технологія виготовлення металоалмазних інструментальних композитів зернистістю АСМ 7/5, АСМ 3/1 для тонкого шліфування сапфіру й полікристалічного діоксиду цирконію передбачала остаточне формування порового простору на стадії теплового пресування.

Одну частину зразків інструментального композиту ущільнювали в присутності гліцерину (рис. 2, пряма 1), іншу частину – в присутності ПЕГ-1500, модифікованого 30 мол.% і 50 мол.% адамантанових кінцевих фрагментів (рис. 2, криві 2 і 3). Зернистість алмазного мікропорошку у всіх випадках була 3/1.

На першому етапі досліджень зразки інструментальних композитів випробували на тертя в парі зі зразками сапфіру і полікристалічного діоксиду цирконію. Випробування проводили на машині тертя ИИ-5018 за схемою «диск – пін» на повітрі при швидкості ковзання 0,5 м/с і тиску 0,38 МПа.

На другому етапі досліджень випробували кільцевий алмазний інструмент (рис. 3) за наступною методикою тонкого алмазного шліфування сферичної поверхні зразків. Як для попереднього формоутворення сферичної поверхні, так і для її фінішної обробки використана однакова схема процесу шліфування, яка передбачала послідовне чергування подачі на врізання інструменту, що обертається і зворотно-обертального руху також обертового зразка, що забезпечує поздовжню подачу інструмента уздовж оброблюваної поверхні (рис. 4). Точне позиціонування алмазного інструменту щодо оброблюваної поверхні забезпечувало досягнення потрібного радіусу сферичної поверхні з високою точністю, при цьому відхилення від сферичності не перевищувало кількох часток мікрометра.



Рис. 3. Кільцевий алмазний інструмент для шліфування сферичної поверхні зразків: зернистістю 125/100 – а, зернистістю 7/5 – б, зернистістю 3/1 – в

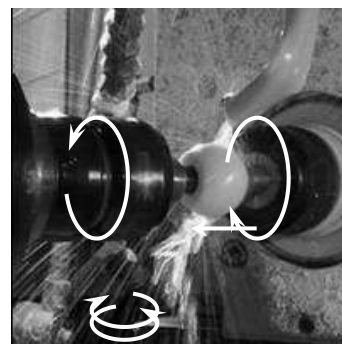


Рис. 4. Алмазне шліфування сферичної поверхні з подачею інструменту на врізання і зворотно-обертальним рухом зразка

Для тонкого алмазного шліфування сферичної поверхні зразків з точністю форми  $\leq 1$  мкм при забезпеченні шорсткості поверхні, що характеризується параметром  $Ra$  0,010...0,020 мкм, використані можливості мультицільового 4-вісьового механообробного станку, спроектованого за технічним завданням ІНМ ім. В. М. Бакуля на НВО «Мікрон» (м. Одеса) [14]. Стенд виготовлено на базі горизонтально-фрезерного верстату з контурною системою ЧПУ і укомплектовано керованим поворотним столом, на якому розміщена додаткова шпиндельна бабка (рис. 5).



Рис. 5. Експериментальний мультицільовий 4-вісьовий станок на базі горизонтально-фрезерного верстату моделі OMM64SCE02

При попередньому шліфуванні сферичної поверхні використовували кільцевої алмазний інструмент зовнішнім діаметром 27 мм, внутрішнім – 19 мм і з попередньо сформованої внутрішньої фаскою під кутом  $45^\circ$  на робочій частини (рис. 3, а). Характеристика інструменту: шліфпорошок алмазу марки АС20 зернистістю 125/100, відносна концентрація 100, зв'язка металева марки М2-01. При тонкому шліфуванні використовували також кільцевий алмазний інструмент зовнішнім діаметром 30 мм, внутрішнім – 20 мм без попередньо сформованої внутрішньої фаски (остання утворилася в процесі зношування інструмента – рис. 3, б і в). Характеристика інструменту: мікропорошок алмазу марки АСМ зернистістю 7/5 і 3/1, відносна концентрація 25, зв'язка експериментальна органічна.

Режими шліфування сферичної поверхні  $\varnothing 28$  мм: швидкість шліфування – 4,1...4,7 м/с; зворотно-обертальний рух зразка – 2...3 подв.хід/хв; подача на врізання в залежності від зернистості інструменту: для сапфіру – 0,0018...0,01 мм/подв.хід і для діоксиду цирконію 0,002...0,03 мм/подв.хід. В якості технологічної середовища використовували мастильно-охолоджувальну технологічну рідину марки ОАК Kool-310, яку зазвичай застосовують на високоточних механооброблювальних центрах. Загальна товщина припуску, знятого при попередньому шліфуванні – 0,10...0,15 мм, при тонкому

шліфуванні алмазним інструментом зернистістю 7/5 – 10...30 мкм, зернистістю 3/1 – 3...10 мкм.

Як при попередньому, так і при тонкому шліфуванні загальну величину припуску знімали в кілька переходів, встановлюючи подачу на врізання алмазного інструменту зернистістю 125/100: для сапфіру – 0,01 мм/подв.хід і для діоксиду цирконію – 0,03 мм/подв.хід; зернистістю 7/5: для сапфіру – 0,005 мм/подв.хід і для діоксиду цирконію – 0,008 мм/подв.хід; зернистістю 3/1 для сапфіру – 0,0018 мм/подв.хід і для діоксиду цирконію – 0,0020 мм/подв.хід. В кінці кожного переходу передбачали роботу без подачі на врізання протягом декількох подвійних ходів. Початкове положення інструменту на кожному наступному переході встановлювали рівним кінцевому положенню інструмента на попередньому переході.

Для порівняльної оцінки якості обробки сферичної поверхні, досягнутої після тонкого шліфування, її додатково доводили алмазною пастою АСМ зернистістю 1/0 на чавунному притирі. Режими доведення сферичної поверхні Ø28 мм притиром зовнішнім Ø27 мм, внутрішнім Ø19 мм: середнє навантаження на проекцію зони притирання від сили притиску –  $(3,5...3,8) \cdot 10^5$  Па; діапазон коливання швидкості доведення в зоні притирання – 0,18 ... 1,17 м/с.

Величину припуску  $\Delta R$ , видаленого у радіальному напрямку, оцінювали за зменшенням радіуса  $R$  сферичної поверхні, який вимірювали за допомогою цифрового мікрометра мод. МКЦ ІР-54-50 з діапазоном виміру розмірів 25-50 мм і точністю до 1 мкм. Про величину лінійного зносу  $\Delta r$  шліфувального інструмента в осьовому напрямку судили побічно, в результаті вимірювання оптичним способом ширини внутрішньої фаски  $b$  на інструменті до і після кожного переходу, значення якої відрізнялися на величину  $\Delta b$  (рис. 6). При цьому на першому переході лінійний знос інструмента не враховували через можливу відсутність контакту інструмента з виробом на початку переходу.

Як видно зі схеми на рис. 6, виконуються наступні співвідношення:

$$R^2 = (r_{\text{вн}} + b)^2 + (H + \Delta R + \Delta r)^2;$$
$$(R - \Delta R)^2 = H^2 + (r_{\text{вн}} + b \pm \Delta b)^2,$$

де  $H$  – поточне положення торця кільцевого інструмента, що має отвір радіусом  $r_{\text{вн}}$ . При відомих  $R$ ,  $\Delta R$ ,  $r_{\text{вн}}$ ,  $b$  і  $\Delta b$  з наведених співвідношень неважко розрахувати величину лінійного зносу  $\Delta r$  інструменту. Відносну продуктивність розраховували як відношення лінійних ( $\Delta R / \Delta r$ ) і об'ємних ( $\Delta W / \Delta w$ ) величин.

Якість обробки сферичної поверхні оцінювали за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографа «Micron-alpha» на базі мікроінтерферометру Линника МИИ-4 (рис. 7, а) за методикою, викладеною в [15].

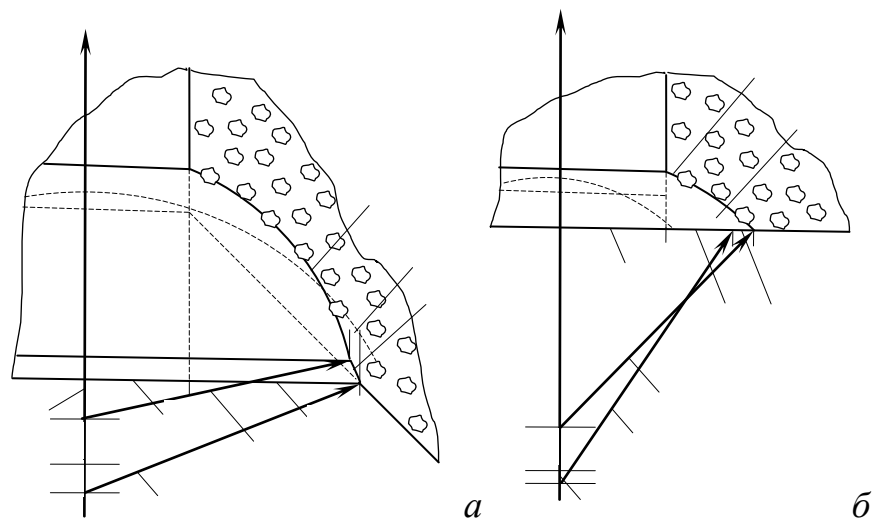


Рис. 6. Схема до розрахунку лінійного зносу інструменту  $\Delta r$  в осьовому напрямку при наявності (а) і відсутності (б) внутрішньої фаски: 1 – положення поверхні інструмента до чергового переходу, 2 – після переходу

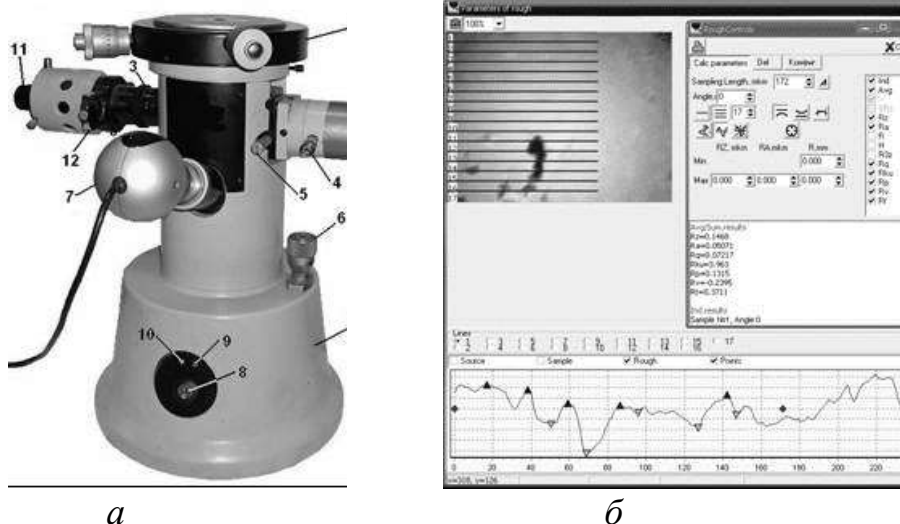


Рис. 7. Безконтактний інтерференційний 3-D профілограф «Micron-alpha» (а) і його інтерфейс (б).

За допомогою профілометра-профілографа «Micron-alpha» отримані зображення ділянок сферичної поверхні діоксиду цирконію, сапфіра після тонкого шліфування алмазним інструментом зернистістю 3/1 і після доведення алмазною пастою АСМ зернистістю 1/0, а також профілограми профілю шорсткості і виконана кількісна оцінка амплітудних ( $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rp$ ,  $Rv$ ,  $Rt$  і  $Rku$ ), просторового ( $Sm$ ) і функціонального ( $tp$ ) параметрів шорсткості, розрахованих з вирівнюванням кривизни профілю за даними вимірів на базовій довжині 172 мкм, середніх для 17-ти трас сканування профілю, розташованих паралельно, як показано на рис. 7, б.

На сучасному етапі розвитку медичної техніки зростає попит на вироби з високоякісних матеріалів, для яких точність виготовлення і якість поверхні є

ключовими факторами, що визначають тривалість їхнього терміну служби [1]. Зважаючи на велику різноманітність форм і розмірів таких виробів, а також часто порівняно невеликі обсяги випуску, для їх виробництва найкраще підходять високоточні механообробні центри, які можуть виконувати складні технологічні переходи і в той же час мають високу гнучкість переналагодження [2-4]. Для отримання прецизійних виробів з сапфіру, полікристалічного діоксиду цирконію застосовують алмазне шліфування [4]. У разі прецизійного шліфування сферичних поверхонь керамічних протезів головок суглобів з точністю форми  $\leq 1$  мкм із зазначених важкооброблюваних матеріалів проблема полягає в забезпеченні шорсткості поверхні виробу, яка характеризується параметром  $Ra$  0,01...0,02 мкм [5].

Деякі фізико-механічні властивості сапфіру й кераміки, виготовленої з нанопорошку діоксиду цирконію, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Деякі фізико-механічні властивості сапфіру  
й полікристалічного діоксиду цирконію

Показник	Са пфір ( $Al_2O_3$ ) [6]	$ZrO_2$ - кераміка*[7]
Густина, $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup>	3,99	6,05
Модуль пружності, ГПа	400	209
Мікротвердість $H_\mu$ , ГПа	9,4–12,2	10–12
Границя міцності під час згинання $R_{bm}$ , МПа	>400	85
Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень І типу $K_{Ic}$ , МПа·м <sup>-1/2</sup>	3,5	8–11

\* – кераміка хімічного складу ( $ZrO_2(+HfO_2)$ ) – основний компонент,  $Y_2O_3$  – 5,3%,  $Al_2O_3$  – <0,05%,  $Fe_2O_3$  – <0,01%,  $SiO_2$  – <0,02%), вміст тетрагональної фази 96%, моноклінної 4%. (ДонФТІ ім. А. А. Галкіна НАН України)

Процес алмазного шліфування або доведення виробів з будь-якого крихкого неметалевого матеріалу, зокрема сапфіру чи полікристалічного діоксиду цирконію, докорінно відрізняється від процесу алмазного шліфування металів [8-9]. Тут мають місце пружно-пластична деформація без руйнування, диспергування припуску при пластичній деформації й крихке руйнування зі сколюванням часток. Характерним результатом знімання припуску під час абразивної обробки є бічні відколи й відрив

кластерів з поверхневого шару, що проявляються у вигляді осередків руйнування, які найбільше впливають на формування шорсткості поверхневого шару. Імовірність тих або інших механізмів руйнування матеріалу визначається як його фізико-механічними властивостями, так і навантаженням на зерна абразиву (залежно від режимів обробки) [9].

На мікрорельєф поверхні, яка формується, впливають, насамперед, геометрична структура робочої поверхні інструменту і кінематика її переміщення (в тому числі геометрія зерен і характер їх розподілу по висоті), коливання інструменту щодо оброблюваної поверхні (тобто жорсткість технологічної системи), пружні і пластичні деформації і крихке руйнування в зоні контакту інструмента і заготовки, хвилястість і шорсткість робочої поверхні інструменту. Випадковий характер рельєфу шліфувального круга є домінуючим у формуванні шорсткості внаслідок випадкового розташування зерен на робочій поверхні круга. Залежно від умов обробки та фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу ступінь впливу кожного з цих факторів на освіту шорсткості буде різною.

Основний вплив на характер руйнування крихкого неметалічного матеріалу здійснює величина нормальної сили на алмазному зерні. При досягненні нормальної сили критичної величини, необхідної для формування бічних тріщин, руйнування відбувається за рахунок сколювання. Величина критичної сили, необхідної для утворення бічних тріщин, може бути

визначена залежністю  $P_{кр} = k_p \cdot \frac{K_{1c}^4}{H_v^3}$ , де  $k_p$  – постійний коефіцієнт, а  $H_v$  – твердість по шкалі Вікерса [10].

Виходячи з фізико-механічних властивостей матеріалів, які розглядаються (табл. 1), критичне значення сили, яка необхідна для утворення бокових тріщин у кераміці, є більшим у 170...200 раз, ніж критичне значення сили для сапфіру. Тому при шліфуванні кераміки є більшим критичне значення площі перетину зрізу матеріалу на зерні, при якому відбуваються відколи, а для утворення сколів на поверхні кераміки потрібно набагато більша, ніж для сапфіра, глибина різання. Отже, при однакових умовах шліфування кількість сколів на обробленій поверхні кераміки повинні бути меншою. З іншого боку, критичний розмір медіанної тріщини, при якій вона починається розвиватися стійким образом при індентуванні, є обернено пропорційним квадрату індексу крихкості матеріалу [10]:  $l_M = \frac{k_M}{(H_v / K_{1c})^2}$ , де  $k_M$  – постійний

коефіцієнт. Виходячи з даних табл. 1, співвідношення індексів кераміки й сапфіру становить 0,2, а критичних розмірів медіанної тріщини – 19,7. Експериментальні дослідження поверхневого шару зразків кераміки після індентування показали [9], що чим меншим є індекс крихкості матеріалу, а отже більшою є величина критичної медіанної тріщини, тим більшим є значення напівдовжини максимальної тріщини в поверхневому шарі і отже глибина тріщинуватого шару під час абразивної обробки.

Результати проведених на сьогодні досліджень не дозволяють в повній мірі уявити механізм формування мікрорельєфу таких крихких матеріалів, як сапфір і полікристалічний діоксид цирконію. Для забезпечення необхідної шорсткості сферичної поверхні цих матеріалів алмазний інструмент для тонкого шліфування повинен стабільно підтримувати такий зазор в зоні контакту, який забезпечував би достатній простір для розміщення шламу, який утворюється при диспергування оброблюваного матеріалу. Важливо також домогтися незалежності потоку шламу як від часу, так і від локалізації плями контакту на поверхні інструменту. З точки зору структури інструментального матеріалу, для виконання згаданих умов необхідно забезпечити оптимальну поруватість композиту при вузькому розподілі поруватих включень за розмірами. До того ж інструментальний композит, призначений для тонкого шліфування, повинен мати досить високу зносостійкість, властиву швидше металоалмазним композитам, ніж композитам на полімерних зв'язках. В іншому випадку рясний потік продуктів зносу зв'язки, що містять значну кількість незруйнованих зерен абразиву, не дозволить досягти рівномірної шорсткості.

## ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ПОРУВАТОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОМПОЗИТУ

Вирішення завдання розробки інструментального матеріалу із зазначеними властивостями пов'язано з виготовленням металоалмазних композитів, які б мали не тільки задану поруватість, але і певну будову поруватого простору. Загальна схема отримання такого композиту – це ущільнення композиту на початковій стадії термообробки в режимі «теплого пресування». При цьому остаточна стадія термообробки, яка забезпечує формування фазового складу й механічної міцності композиту, відбувається в умовах його вільного спікання.

За умов теплового пресування вирішальну роль у формуванні структури поруватості композиту має рідкий технологічний зволожувач порошкової композиції. При ущільненні полідисперсного ансамблю частинок різної форми, яке супроводжується їх деформацією, в системі утворюються численні канали змінного перерізу, в яких переміщуються локальні потоки зволожувача. Тому результуюча геометрична будова поруватого простору помітним чином залежить від механізму і кінетичних особливостей течії органічної рідини на стадії брикетування. Кількісний опис такої течії ускладнений, проте на якісному рівні є очевидним, що ця течія залежить від поєднання саме тих властивостей рідини, яке може бути визначене як нелінійність реологічної поведінки. Кількісною мірою нелінійності течії рідини може слугувати показник ступеню в моделі Оствальда де Вілля [11–13]. У даному дослідженні міру нелінійності течії зволожувача оцінювали на якісному рівні, виходячі з експериментально визначеної залежності швидкості течії рідини від тиску у капілярі.



Традиційно при виготовленні металоалмазних композитів використовують гліцерин. Наприклад, при виготовленні інструментальних композитів для тонкого шліфування крихких неметалічних матеріалів в порошкову композицію, що складається з міді, олова, синтетичних алмазів і твердого змащення, вводять зволожувач (гліцерин) в кількості 2% по масі. Суміш піддають попередньому брикетуванню при кімнатній температурі з подальшим підпресуванням при температурі 553 °К.

За використання гліцерину як висококиплячої речовини (температура кипіння 563 °К) картина просторового розподілу поруватих включень виявляється прямо пов'язаною з динамікою перерозподілу рідини в процесі зближення часток компонентів. Залежність швидкості витікання гліцерину від тиску у капілярі виявилася досить слабкою, що свідчить про малу ступінь нелінійності течії гліцерину [11]. Слід зазначити, що застосування гліцерину призводить до отримання матеріалів з досить широким розподілом поруватих включень, який має полімодальний характер [11].

Відомо, що для гомологічних рядів органічних олігомерів нелінійність реологічних характеристик посилюється зі збільшенням молекулярної маси. Близький за фізико-хімічною природою аналог гліцерину, поліетіленгліколь (ПЕГ) доступний у вигляді олігомерів з різною молекулярною масою. Для експериментів був обраний продукт з молекулярною масою 1500, що більш ніж на порядок перевищує молекулярну масу гліцерину, що дорівнює 97.

Олігомер ПЕГ-1500 був модифікований шляхом прищеплення фрагментів адамантану, що дозволило отримати речовину, яка складається з доволі довголанцюгових гідрофільних молекул з масивними гідрофобними групами на кінцях (рис. 1).

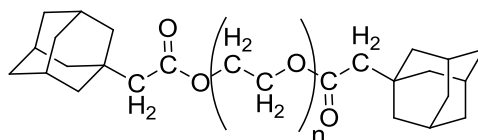


Рис. 1. Фрагмент ПЕГ-1500 с масивними гідрофобними групами адамантану на кінцях

В умовах присутності прищеплених гідрофобних масивних кінцевих функціональних груп похідного адамантану істотно підсилюється нелінійність залежності швидкості течії від величини тиску у капілярі (рис. 2). Максимальна ступінь нелінійності системи досягається при 50 мол.% прищеплених адамантанових фрагментів, але при збільшенні їх вмісту до 80 мол.% поведінка системи при 553 °К знову наближається до поведінки гліцерину. Отримані результати корелюють з представленими розподілами поруватих включень за розмірами для металоалмазних компактів, що містять відповідні продукти в якості зволожувачів [11]. Найбільшій нелінійності реологічної поведінки зволожувача відповідає найбільш вузький розподіл за розміром поруватих включень інструментального компакту. У свою чергу, рівномірність розмірів поруватих включень у тонкозернистих

інструментальних композитах суттєво впливає на контактну поведінку останніх.

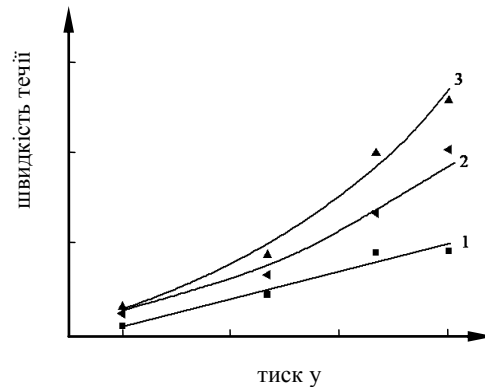


Рис. 2. Залежність швидкості течії зволожувача від тиску у капілярі: 1 – гліцерин; 2 – ПЕГ-1500, модифікований 30 мол.% адамантану; 3 – ПЕГ-1500, модифікований 50 мол.% адамантану.

Підтверджено пікнометричними вимірами, що інструментальні композити, спечені таким чином, мають відносно невелику поруватість (9,6-10%) при відкритому характері системи поруватих включень [12]. Остання обставина дозволяє з достатньою повнотою описати розподіл поруватих включень композитів за розмірами з використанням адсорбційного методу [13].

Оскільки недоліком виготовлення інструментальних композиційних матеріалів із застосуванням гліцерину як традиційної зволожуючої добавки є формування поруватості з досить широким розподілом розмірів поруватих включень, який має полімодальний характер і пов'язаний з малим ступенем нелінійності течії гліцерину, застосування поліетиленгліколю, модифікованого похідним адамантану, як видається, має значно підвищити нелінійність залежності швидкості течії зволожувача від тиску і, відповідно, звужити розкид поруватих включень за розмірами. Проте, результати проведених раніше досліджень не дозволяють зіставити будову поруватого простору одержуваних інструментальних композитів з особливостями їх поведінки в динамічному контакті з крихкими неметалевими матеріалами при тонкому шліфуванні останніх.

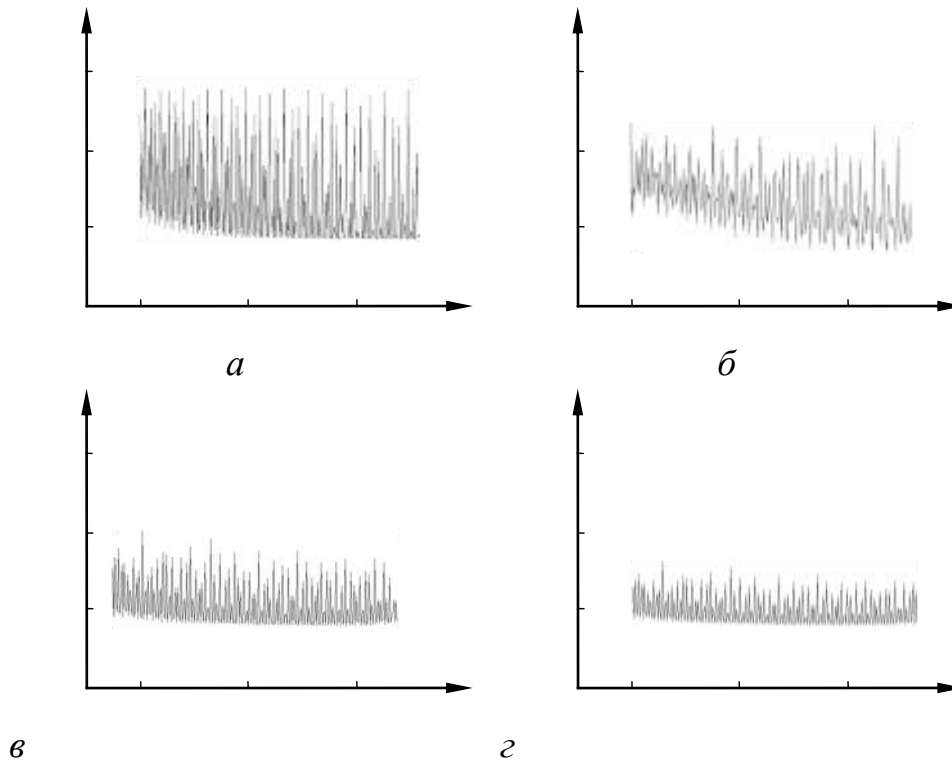
Метою дослідження було виявити вплив структури поруватості на характер взаємодії інструментального композиту, виготовленого із застосуванням модифікованого поліетиленгліколю, з поверхнею сапфіру й полікристалічного діоксиду цирконію, а також ефективність такого композиту при тонкому алмазному шліфуванні цих чутливих до пошкоджень матеріалів (продуктивність процесу, знос шліфувального круга, формування мікрорельєфу поверхні).

### РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті випробувань отриманих зразків інструментальних композитів на тертя в парі зі зразками сапфіру й полікристалічного діоксиду цирконію на машині тертя ИИ 5018 за схемою «диск-циліндричний пін» на повітрі при швидкості ковзання 0,5 м/с і тиску 0,38 МПа отримані трибограми контактної взаємодії інструментальних композитів із зазначеними матеріалами (рис. 8).

Показники відповідно лінійного й об'ємного знімання припуску, зносу кільцевого алмазного інструмента під час попереднього й прецизійного шліфування сапфіру й діоксиду цирконію наведені в табл. 2.

Як при попередньому, так і при прецизійному шліфуванні сферичної поверхні матеріалів в дослідженому діапазоні зміни сумарної глибини різання  $t$  відносна продуктивність  $\square R / \square r$  практично не залежить від величини  $t$  (рис. 9). Якщо при попередньому шліфуванні сапфіру алмазним інструментом зернистістю 125/100 це відношення приблизно на 8% вище, ніж при шліфуванні діоксиду цирконію, і коливається в діапазоні 0,72 ... 0,78, то при прецизійному шліфуванні сапфіру інструментом зернистістю 7/5 цей показник навпаки приблизно на 19% нижче, і приймає значення в діапазоні 0,03...0,06, так само як і при прецизійному шліфуванні обох матеріалів інструментом зернистістю 3/1.



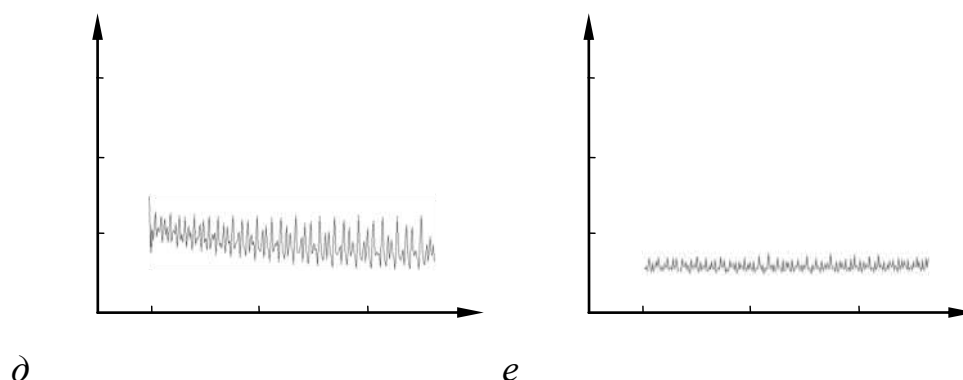


Рис. 8. Трибограми випробувань інструментального композиту на тертя в парі із сапфіром (а) і діоксидом цирконію (б) при ущільненні композиту в присутності: гліцерину; ПЭГ-1500, модифікованого 30 мол.% (відповідно в і з), а також 50 мол.% (відповідно д і е) адамантанових кінцевих фрагментів.

Таблиця 2. Показники відносної продуктивності, зносу інструменту при шліфуванні сапфіру і діоксиду цирконію алмазним інструментом

Показники відносної продуктивності, зносу круга	Відносне знімання припуску		Відносний знос круга		
	Лінійний $\Delta$ $R/\Delta r$	Об'ємний $\Delta$ $W/\Delta w$	Лінійний $\Delta$ $R/\Delta r$	Об'ємний $\Delta$ $W/\Delta w$	
Зернистість алмазного шліфувального круга	Оксид алюмінію монокристалічний (сапфір)				
	125/100	0	4	1	0
		,76	,52	,32	,22
	7/5	0	0	1	3
		,06	,28	6,67	,57
	3/1	0	0	3	7
		,03	,14	3,33	,14
	Діоксид цирконію полікристалічний				
	125/100	0	4	1	0
		,68	,04	,47	,25
	7/5	0	0	5	1
		,19	,89	,26	,12
3/1	0	0	1	3	
	,06	,28	6,67	,57	

Якщо при попередньому шліфуванні сапфіра інструментом зернистістю 125/100 це відношення приблизно на 8% вище, ніж при шліфуванні діоксиду цирконію, і коливається в діапазоні 0,72...0,78, то при прецизійному шліфуванні інструментом зернистістю 7/5 цей показник навпаки приблизно на 19% нижче, і приймає значення в діапазоні 0,03...0,06, так само як і під час прецизійного шліфування обох матеріалів інструментом зернистістю 3/1.

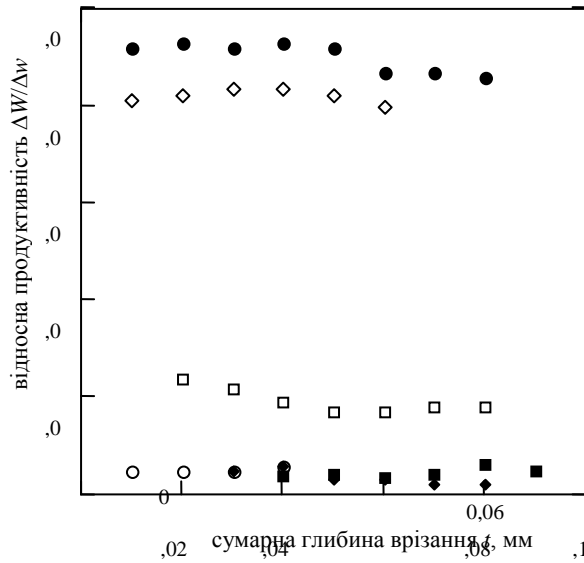
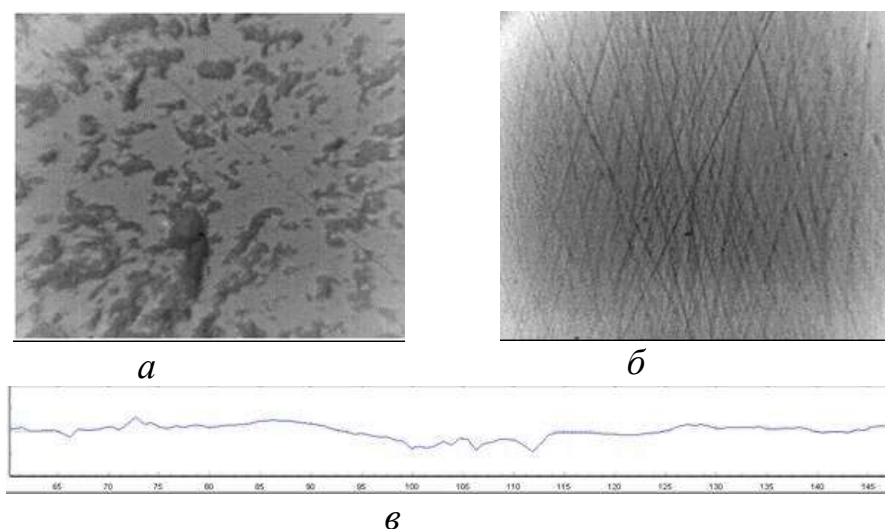


Рис. 9. Залежність відносної продуктивності  $\Delta W/\Delta w$  при шліфуванні: сапфіру інструментом зернистістю 125/100 (●), 7/5 (■) і 3/1 (◆), а також діоксиду цирконію (відповідно ◇, □, ○), від величини сумарної глибини різання  $t$ .

На рис. 10-11 наведені зображення ділянок поверхні сапфіру й діоксиду цирконію після шліфування алмазним інструментом зернистістю 3/1 і після доведення алмазною пастою АСМ зернистістю 1/0, а також відповідні профілограми профілю шорсткості. Профілограми профілю сапфіру показані для траси сканування зі значенням середнього кроку нерівностей (відповідно  $Sm = 32,9$  мкм і  $Sm = 17,9$  мкм), найбільш близьким до середнього значення серед сімнадцяти трас сканування, зазначеного в табл. 3 (див. рис. 7, б). Профілограми профілю діоксиду цирконію показані для траси сканування зі значенням середнього кроку нерівностей (відповідно  $Sm = 13,8$  мкм і  $Sm = 14,7$  мкм), найбільш близьким до середнього значення серед сімнадцяти трас сканування, зазначеного в табл. 3.



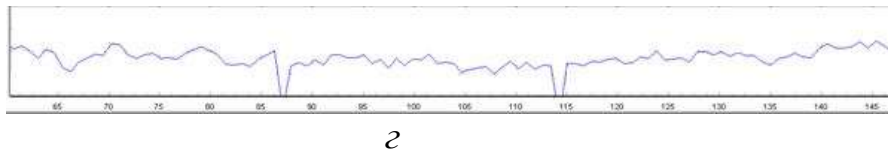


Рис. 10. Зображення ділянок поверхні сапфіру після тонкого шліфування (а) й доведення (б), а також характерні для зазначених методів механічної обробки профілограми профілю – відповідно (в) і (г).

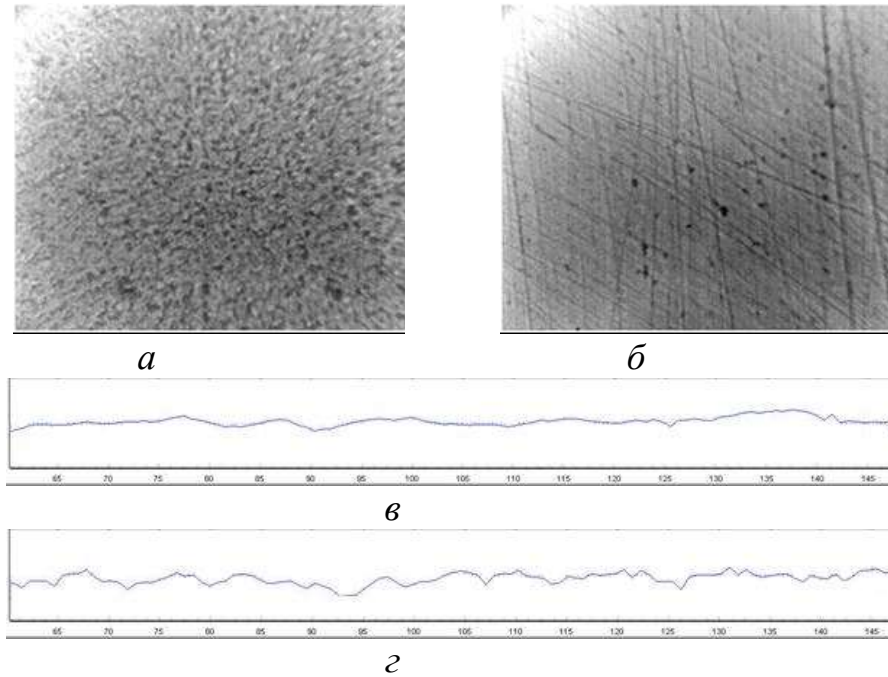


Рис. 11. Зображення ділянок поверхні діоксиду цирконію після тонкого шліфування (а) й доведення (б), а також характерні для зазначених методів механічної обробки профілограми профілю – відповідно (в) і (г).

Таблиця 3. Висотні параметри шорсткості поверхні сапфіру й діоксиду цирконію після тонкого шліфування і доведення

Матеріал, вид обробки	Діоксид цирконію		Сапфир	
	Шліфування кругом АСМ 3/1	Доведення пастою АСМ 1/0	Шліфування кругом АСМ 3/1	Доведення пастою АСМ 1/0
Параметр шорсткості				
$Ra$ ,	0,006	0,00	0,05	0,0
мкм	9	73	1	18
$Rq$ ,	0,008	0,00	0,07	0,0
мкм	7	95	1	22
$Rp$ ,	0,022	0,02	0,13	0,0
мкм	3	19	6	46
$Sm$ ,	17,8	18,6	34,8	18,

МКМ		55,8	59,4	51,7	0
	$tp^*$ , %	0,047	0,05	0,33	61,
	$Rt$ , 6		47	0	2
МКМ		0,038	0,03	0,14	0,0
	$Rz$ , 1		73	2	92
МКМ		3,192	4,04	5,12	0,0
	$Rku$	0,025	6	4	51
	$Rv$ , 3		0,03	0,19	3,0
МКМ			28	4	63
					0,0
					46

\* – відносна опорна довжина визначена на рівні середньої лінії.

## РОЗДІЛ 4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

При випробуваннях на тертя інструментальні композити, отримані з використанням гліцерину як зволожуючої добавки, продемонстрували порівняно велику амплітуду коливань коефіцієнта тертя, як в контакті з сапфіром, так і діоксидом цирконію (рис. 8, *a* і *б*). На нашу думку, цей результат відображає нерівномірність потоку суспензії шламу, яка утворюється в робочій зоні і призводить в свою чергу до нерівномірності миттєвої картини розподілу сил. У підсумку, ця нерівномірність призводить до формування дефектного поверхневого шару обробленого матеріалу як сапфіра, так і діоксида цирконію. Для композитів, ущільнених з використанням ПЕГ-1500, модифікованого 30 мол.% похідними адамантану, амплітуди трібограмм для обох оброблюваних матеріалів також великі (рис. 8, *в* і *г*).

Однак при збільшенні ступеня модифікування до 50 мол.% інструментальний композит показав у парі з діоксидом цирконію істотне зниження амплітуди коливань коефіцієнта тертя (рис. 8, *е*), що свідчить про набагато більш стабільну динаміку видалення припуску. Навпаки, у випадку пари з сапфіром не вдалося досягти в достатній мірі поліпшення трибологічних властивостей (рис. 8, *д*). Як видається, сапфір, як монокристал зі значною анізотропією властивостей, виявився занадто чутливим навіть до відносно малих неоднорідностей в будові порової системи інструментального композиту. Можливо також, що в цьому випадку важливим є не тільки розподіл поруватих включень за розмірами, але і величина найбільш ймовірного значення розміру пор, яку також слід зменшувати. Подальше зменшення розміру поруватих включень може бути

досягнуто шляхом використання при ущільненні композитів зволожуючою добавки з більшим ступенем нелінійності реологічних властивостей.

З отриманих результатів випливає, що продуктивність попереднього шліфування сапфіру приблизно на 10% вище, ніж діоксиду цирконію, а знос інструменту при цьому є на 10% нижчим. У той же час продуктивність тонкого шліфування діоксиду цирконію інструментом зернистістю 7/5 приблизно в 3 рази вище, ніж сапфіра, а знос інструменту є в 3 рази нижчим. При використанні інструменту зернистістю 3/1 продуктивність шліфування діоксиду цирконію є в 2 рази вищою, а знос інструменту – в 2 рази нижчим, ніж при шліфуванні сапфіру.

Зниження зернистості алмазного інструменту до 3/1 забезпечує отримання однорідної поверхні діоксиду цирконію, без видимої під збільшенням сітки штрихів при відповідному зниженні висотних параметрів шорсткості (див. табл. 2). Подальше доведення поверхні алмазною пастою залишає видиму під збільшенням сітку штрихів обробки. Кількісна оцінка висотних параметрів шорсткості показала їх підвищення в порівнянні з тонким шліфуванням на 5-10%, при 15%-му зростанні параметру  $R_v$ , що свідчить про тенденцію до формування платообразного профілю поверхні в процесі доведення.

Результати візуального дослідження поверхні сапфіру після тонкого шліфування алмазним інструментом зернистістю 3/1 вказують на наявність на тлі загалом однорідного мікрорельєфу великої кількості розподілених по поверхні дрібних виколювань глибиною 0,1-0,3 мкм, в окремих випадках – 0,4-0,5 мкм і навіть 1,4 мкм (рис. 10, в-д). При цьому спостерігається збільшення амплітудних параметрів шорсткості  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  в 1,6-1,7 рази в порівнянні з їх значеннями після тонкого шліфування діоксиду цирконію в місцях, де відсутні виколювання глибиною 0,4-0,5 мкм і вище (табл. 2). Наявність останніх різко погіршує показники шорсткості (приблизно в 3 рази). Подальше доведення поверхні сапфіру залишає видиму під збільшенням сітку штрихів обробки глибиною не більше 0,02-0,03 мкм і повну відсутність виколювань. Проте значення амплітудних параметрів шорсткості після доведення є в 1,6-1,7 рази вищим, ніж при доведенні діоксиду цирконію, що свідчить про в цілому гіршу оброблюваність сапфіру алмазним інструментом.

## **РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ**

Метою даного розділу є проведення аналізу стартап-проекту для визначення принципової можливості його впровадження на ринок та можливих напрямків реалізації цього впровадження.

### **5.1. Опис ідеї проекту**



У цьому розділі буде описаний стартап-проект, який базуватиметься на отриманих раніше результатах, виготовлення гібридних підшипників з кераміки які будуть використовуватися в газо-турбінних двигунах.

У таблиці 5.1 подано інформацію, яка дає цілісне уявлення про зміст ідеї, можливі потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів та вигоди для користувача.

Таблиця 5.1- Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки користування	Вигода для користувача
- Виготовлення гібридних підшипників з кераміки	Газо-турбінні двигуни які в свою чергу повсюдно використовуються в машинобудуванні, авіації тощо	- Збільшена потужність двигунів при незмінюваних розмірів (за рахунок збільшених швидкостей роботи)

Таблиця 5.2- Аналіз техніко-економічних переваг даної ідеї

	Мій проект	Стандартний підшипник
Виготовлення	Власна розробка технологічного процесу, що позбавить	Використання патенту

	плати за патент	
Матеріал	Високо вартісна кераміка з карбіду бору	Низько вартісна сталь

## 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Після того як було проведено аудит технології, за допомогою якого можна реалізувати ідею проекту, можна визначити технологічність здійсненності ідеї проекту (табл. 5.3).

Таблиця 5.3- Технологічна здійсненність ідеї проекту.

Ідея проекту	Наявність технологій	Доступність технологій
Виготовлення гібридних підшипників з кераміки для газотурбінних двигунів	Виготовлення підшипників на модернізованому верстаті	Верстат та деталі для модернізування доступні на ринку
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: алмазне доведення		

За результатами можна зробити висновок, що технічна реалізація проекту можлива.

## 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначивши ринкові можливості, їх можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, що дозволить спланувати напрямки розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Аналіз попиту показав, що на ринку доступні гібридні підшипники з кераміки, але доступність виготовлення відстають від нашої, тому за попереднім оцінюванням проект є привабливим для входження. За результатами аналізу можна зробити висновок, щодо можливості роботи на ринку з огляду на відсутність таких унікальних характеристик у конкурентів. Також слід відзначити зростаючу динаміку ринку, так як вимоги до газо-

турбінних двигунів зростають, а значить і вимоги до якості і кількості виготовлення підшипників теж. Обмеженням для виходу на ринок є наявність суворих вимог до стандартизації та сертифікації виробів.

Визначення потенційних груп клієнтів, їх характеристики, та формування орієнтовного переліку вимог до товару для кожної групи (табл. 5.4)

Таблиця 5.4- Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Вимоги споживачів до товару
Підвищення технічних характеристик підшипників	Газо-турбінні двигуни для машинобудування, авіації тощо.	-Надійність -Зносостійкість -Робота в над жорстоких умовах

Після визначення потенційних груп клієнтів проведено аналіз ринкового середовища: складено таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл 5.5-5.6)

Таблиця 5.5 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Вартість	Вища вартість ніж у металевих гібридних підшипників	Відмова від використання
2	Складність обладнання	Складніше для налаштування	Відмова від використання

		обладнання у порівнянні зі стандартними гібридними підшипниками	
--	--	---	--

Таблиця 5.6 -Фактори можливостей

п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Підвищення потужності газотурбінних двигунів	Можливість використовувати двигуни в складних умовах	Перехід на використання гібридних підшипників з кераміки

Надалі проведено аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.7).

Таблиця 5.7- Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Вказати тип конкуренції	Чиста	Акцент на унікальних характеристиках товару

За рівнем конкурентної боротьби	Міжнародна	Продуманий маркетинг та зв'язки з виробництвами
За галузевою ознакою	Внутрішньогалузева	Акцент на унікальних характеристиках товару
Конкуренція за видами товарів	Товарно-родова	Конкуренція між різними видами товарів, які можуть виконувати подібні функції
За характером конкурентних переваг	Нецінова	Головною конкурентною перевагою є підвищення потужності газо-турбінних двигунів

Проведення більш детального аналізу умов конкуренції в галузі за моделлю 5 сил М. Портера є недоречним, оскільки в даного проекту немає конкурентів, постачальників, товарів-замінників та клієнтів, тому що він ще на стадії розробки. Так як аналогів проекту ще не створено немає необхідності аналізувати перелік факторів конкурентоспроможності та сильні і слабкі сторони стартап-проекту в порівнянні з товарами-конкурентів.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.8).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового

середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 5.8- SWOT-аналіз стартап-проекту

<p><b><i>Сильні сторони:</i></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Унікальність виготовлення</li> <li>- Підвищення потужності двигунів</li> <li>- Інноваційність технології</li> <li>- Супроводження проекту, введення і підтримка на всіх етапах реалізації.</li> </ul>	<p><b><i>Слабкі сторони:</i></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Складніше виробництво</li> <li>- Вища ціна</li> </ul>
<p><b><i>Можливості:</i></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Можливість збільшення обсягів продаж за рахунок заключення спеціальних контрактів;</li> <li>- Отримання фінансування від зацікавлених концернів.</li> </ul>	<p><b><i>Загрози:</i></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Конкуренція на ринку</li> <li>- Ненадійність продукту</li> </ul>

#### 5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Так як цільових аудиторій декілька: машинобудування, авіація ракетобудування тощо, то стратегія охоплення ринку – стратегія диференційованого маркетингу, так як компанія зосереджується на декількох сегментах.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 5.9)

Таблиця 5.9- Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова Стратегія розвитку
Розвиток ринку	Масовий маркетинг	Низькі витрати створюють бар'єр входу для нових конкурентів і одночасно хороший захист проти товарів- замінників. Можливість досягнення ефекту масштабу і досвіду.	Стратегія лідерства по витратах
Розвиток ідеї	Диференцій ований маркетинг	Відмітні властивості товару і завойована прихильність клієнтів захищають фірму і від товарів- замінників. Підвищена рентабельність збільшує стійкість до можливого зростання витрат в результаті дії сильного постачальника.	Стратегія диференційованості

На основі таблиці 5.9 обрана базова стратегія розвитку – стратегія диференційованості. Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (таблиця 5.10.)

Таблиця 5.10- Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопроходцем» на ринку	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або Забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристи ки товару конкурента?	Стратегія конкурентної поведінки
Так	Так	Ні	Стратегія лідера
Ні	Так	Ні	Стратегія виклику лідера
Ні	Ні	Так	Стратегія наслідування лідеру
Так	Ні	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

На основі таблиці 5.10 стратегія конкурентної поведінки- стратегія виклику лідера.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку розробляється стратегія позиціонування (таблиця 5.11), що полягає у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельний проект.



Таблиця 5.11 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
<p>- Підвищення потужності двигунів</p> <p>- Надійність</p> <p>- Зносостійкість</p>	Стратегія диференційованості	<p>- Унікальна технологія виготовлення.</p> <p>- Підвищені характеристики якості</p>	Унікальніс ть, якість, зносостійкість, надійність

### 5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару. Він говорить нам про те, що ключовою перевагою нашого продукту є унікальна технологія виготовлення та підвищення характеристик якості яка задовольняє потребу підприємств в підвищенні якості виготовлення газо-турбінних двигунів.

Надалі розроблено трирівневу маркетингову модель товару: уточнюється ідея продукту/послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (таблиця 5.12).

Таблиця 5.12- Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
Товар за задумом	Гібридний підшипник з кераміки для газо-турбінних двигунів
Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики: якісний гібридний підшипник з кераміки
	Якість: стандарти і сертифікація підшипників
Товар із підкріпленням	Тренінги з користування, якісний пост-продажний сервіс
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Патент.	

Визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар є недоцільним, оскільки остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту, наявності повної інформації та готового технічного рішення для виготовлення.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якої приймається рішення (таблиця 5.13):

- збут буде проводитись власними силами, тобто буде реалізовано власну систему збуту;
- оптимальна глибина каналу збуту: канал збуту нульового рівня (виробник сам продає товар кінцевому споживачеві).

Таблиця 5.13- Формування систем збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Характерно для промисловості	Просування на ринок подібного	Канал нульового рівня	Канал складається з

малими або середніми серіями, який може бути придбаний необмеженим числом споживачів	продукту в рамках даної системи збуту вимагає широкої реклами		виробника, який продає свій товар безпосередньо споживачам (через відділ збуту, мережу фірмових магазинів, тощо)
--	---	--	--

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (таблиця 5.14).

Таблиця 5.14- Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Характерно для промисловості малими або середніми серіями, який може бути придбаний необмеженим числом споживачів	Включають в себе пряму поштову розсилку, продаж в режимі онлайн	Конкурентне позиціонування, яке базується на Демонстрації переваг товарів Підприємства над товарами конкурентів.	Отримати можливість у кілька разів Збільшити обсяг продажу своїх товарів	Головними елементами структури реклами є тема реклами і девіз рекламної кампанії

## 5.6 Висновки розділу

У ході розробки стартап-проекту було проаналізовано можливості ринкової комерціалізації проекту. За результатами аналізу було виявлено, що

технологічна реалізація проекту можлива, визначені його сильні та слабкі сторони, напрямки впровадження, вигоди для користувача.

Даний ринок є привабливим для входження через унікальність технології виготовлення та підвищених якостей. З огляду на потенційні групи клієнтів, суттєвих бар'єрів входу на ринок не виявлено, через унікальність технології, оскільки аналогів ще не створено.

Даний проект можна вважати перспективним для впровадження та є доцільною подальша його імплементація.

## **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

Досліджено застосування поліетиленгліколю, модифікованого похідним адамантану в діапазоні 30...70 мол.% для виготовлення інструментальних композиційних матеріалів, що різко підвищує нелінійність течії зволожувача і відповідно знижує розкид поруватих включень композитів за розмірами. Максимальний ступінь нелінійності системи досягається при 50 мол.% прищеплених адамантанових фрагментів. Встановлено, що найбільшій нелінійності реологічної поведінки зволожувача відповідає найбільш вузький розподіл поруватих включень у компактi за розмірами. Зі збільшенням ступеня модифікування до 50 мол.% інструментальний композит показав у парі тертя з полікристалічним діоксидом цирконію істотне зниження амплітуди коливань коефіцієнта тертя, що свідчить про набагато більш стабільну динаміку видалення припуску. Навпаки, у парі з сапфіром не вдалося досягти в достатній мірі поліпшення трибологічних властивостей. Дослідження мікроегеометрії сформованого поверхневого шару керамічних матеріалів після алмазного шліфування підтверджують цей висновок.

Показники відносної продуктивності, зносу алмазного інструменту при попередньому шліфуванні приблизно однакові для обох досліджуваних матеріалів. У той же час при тонкому шліфуванні ці показники відрізняються в 2 або 3 рази в залежності від зернистості алмазного інструменту.

Шорсткість поверхні полікристалічного діоксиду цирконію при його тонкому шліфуванні в цілому в 4-5 разів нижче, ніж у сапфіра. Подальше доведення поверхні алмазною пастою зернистістю 1/0 залишає видиму під збільшенням сітку штрихів обробки. Кількісна оцінка висотних параметрів шорсткості поверхні діоксиду цирконію показала їх підвищення в порівнянні зі шліфуванням приблизно на 10%.

На відміну від діоксиду цирконію на шліфованій поверхні сапфіру спостерігаються виколювання, для виключення яких слід прагнути забезпечити будову порового простору композиту не тільки з певним

розкидом розподілу поруватих включень за розмірами, але і зі зменшеною величиною їх найбільш вірогідного значення. Доведення поверхні сапфіра дозволила виключити виколювання і забезпечити зниження висотних параметрів шорсткості поверхні приблизно в 3 рази. Проте досягнуті результати доведення поверхні сапфіра залишаються в 1,7 рази гіршими, ніж у доведенні поверхні діоксиду цирконію.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Корж М. О., Філіпенко В. А., Танькут В. О., Косяков О. М., Танькут О. В., Сохань С. В. Сучасні тенденції використання пар тертя в ендопротезах суглобів людини (огляд літератури та власних досліджень) / Журнал НАМН України. – 2017. – Т. 23, № 3-4. – С. 247-255.
2. Jan-Willem van Iperen, Ruud Zanders. New Strategies for Orthopedic Machining. – <https://www.secotools.com/article/83778?language=en>
3. Femoral head machining solutions – Sandvik Coromant. – <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/industriesolutions/medical/hip/pages/femoral-head.aspx>
4. Muller A., Denkena B. Fine Grinding of Bioceramics for Knee Implants with Elastically Bonded Abrasives: Process Modeling and Validation / J. Ceram. Sci. Tech., 06 [01] 31-40 (2015) DOI: 10.4416/JCST2014-00024
5. ISO 7206-2: Implants for surgery – Partial and total hip joint prostheses: Articulating surfaces made of metallic, ceramic and plastic materials – <https://www.iso.org/standard/51947.html>
6. Добровинская Е. Р., Литвинов Л. А., Пищик В. В. Энциклопедия сапфира. – Харьков: Ин-т монокристаллов, 2004. – 508 с.
7. Фазовая стабильность керамики на основе нанопорошков  $ZrO_2 - 3 \text{ mol\% } Y_2 O_3$ , компактированных в условиях высокого гидростатического давления / Ф.И. Глазунов, Г.К. Волкова, Т.Е. Константинова, И.А. Даниленко, В.А. Глазунова // Физика и техника высоких давлений. – 2014. – Т. 24, № 3-4. – С. 100-110.
8. Полирование элементов оптико-электронной техники из монокристаллического карбида кремния / Филатов Ю. Д., Ветров А. Г., Сидорко В. И., Филатов А. Ю., Ковалев С. В., Курилович В. Д., Данильченко М. А., Прихна Т. А., Боримский А. И., Куцай А. М., Полторацкий В. Г. // Сверхтв. материалы. – 2015. – № 1. – С. 63–71.
9. Гусев В. В., Калафатова Л. П. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики: монография. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 250 с.
10. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. – М.: Машиностроение, 1999. – 544 с
11. Minale, Mario. "Modelling the flow of a second order fluid through and over a porous medium using the volume averages. I. The generalized Brinkman's equation." / *J. Physics of Fluids* 28[2] 20-35 (2016): DOI:10.1063/1.4941575
12. Walicka, A. "Simulation of the flow through porous layers composed of converging-diverging capillary fissures or tubes. / *Int.J. Applied Mechanics and Engineering* 23 [1] 161-185 (2018) DOI: 10.1515/ijame-2018-0010
13. Morhell, N., and H. Pastoriza. "Power law fluid viscometry through capillary filling in a closed microchannel." / *Sensors and Actuators B: Chemical* , 227 24-28. (2016): doi:10.1016/j.snb.2015.12.033
14. Розенберг О.А., Сохань С.В., Возный В.В. Шлифование имплантатов из сапфира и керамики, имеющих прецизионные сферические поверхности / Інструментальний світ. – 2012. – № 2 (54). – С. 14-
15. Оценка шероховатости гладких поверхностей неметаллов микроинтерференционным методом / С.В. Сохань, Й. Гавлик, М. Нимчевська-Войцек, Д.В. Ефросинин, Н.А. Мельник-Кагляк / Журнал інженерних наук. – 2015. – Том 2, № 2 – С. D1-D9.
16. Garlicki M., Kreczko R. Arthrosis deformans coxae. – Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWZ, 1974

17. Ryniewicz A. 11. Tribologia biołożysk // Mechanika w medycynie. – 2002. – 6. – S. 111–125. Ryniewicz A.
18. Ryniewicz A. M. 12. Analiza mechanizmu smarowania stawu biodrowego człowieka: Monografia a. – Kraków: Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2002.
19. Będziński R.1. Biomechanika inżynierska. Wybrane zagadnienia. – Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997.
20. Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna. T. 5. Biomechanika i inżynieria rehabilitacyjna / Red. R. Będziński, M. Nałęcz. – Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2004. – S. 445–468
21. Morecki A., Ekiel J., Fidelus K.3. Bionika ruchu. – Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1971
22. Mrozowski J., Awrejcewicz J.4. Podstawy biomechaniki. – Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2004.
23. Sokołowski B.5. Zarys anatomii człowieka. Cz. I i II. – Kraków: Wydawnictwo Skryptowe, 2004
24. Burcan J., Cwanek J., Gierzyńska-Dolna M., Korzyński M.6. Biotribologiczne aspekty smarowania na przykładzie endoprotezy stawu biodrowego // Tribologia – teoria i praktyka. – 1996. – 4. – S. 338–353.
25. Gierzyńska-Dolna M.7. Biotribologia. – Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2002.
26. Pytko St., Pytko-Polończyk J.8. Stawy człowieka – najdoskonalsze łożyska // Tribologia – teoria i praktyka. – 1992. – 4. – S. 74–79.
27. Pytko St., Wierzchowski K., Pytko-Polończyk J. Problemy tribologiczne stawów człowieka // Mechanika w medycynie. – 1993. – 1. – S. 97–107.
28. Ryniewicz A. M. 10. Badanie i analiza kształtu powierzchni roboczych stawu biodrowego // Mechanika w medycynie. – 2000. – 5. – S. 195–202.
29. Korzyński M., Cwanek J. 14. Procesy zużycia w stawie biodrowym człowieka // Mechanika w medycynie. – 1993. – 1. – S. 123–127.
30. Gierzyńska-Dolna M.15. Problemy tribologiczne w naturalnych i zastępczych stawach człowieka // Inżynieria biomateriałów. – 1997. – 1. – S. 8–12.
31. Ардамацкий А. Л. Алмазная обработка оптических деталей. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с. Цеснек Л. С.
32. Механика и микрофизика истирания поверхностей. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с. Справочник
33. технолога-оптика: Справ. / Под общ. ред. С. М. Кузнецова, М. А. Окатова. – Л.: Машиностроение (ЛЮ), 1983. – 414 с. Поперенко Л. В., Филатов Ю. Д.
34. Технологія обробки оптичних поверхонь. – Київ: Видавничо-поліграф. центр «Київський університет», 2004. – 166 с. Орлов П. Н.
35. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. – М.: Машиностроение, 1988. – 383 с. Рогов В. В.
36. Финишная алмазно-абразивная обработка неметаллических деталей. – Київ: Наук. думка, 1985. – 264 с. Филонов И. П., Климович Ф. Ф., Козерук А. С.
37. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов. – Мн.: Дизайн, 1995. – 208 с. Рогов В. В., Филатов Ю. Д.
38. Прецизионное формообразование плоских, сферических, цилиндрических и шарообразных поверхностей оптических элементов // Формообразование оптических поверхностей: В 2 т. / Труды междунар. академии «Континант»: Рос. отд. – М.: Континант, 2005. – Т. 1. – С. 28–91.
39. Жигалко Н. И., Яцура Е. С.751. Обработка материалов, станки и инструменты. – Мн.: Высшая школа, 1984. – 373 с. Сулим А. В.
40. Производство оптических деталей. – М.: Высшая школа, 1975. – 315 с. Шепелев А. А., Пасичный О.О.
41. Технология алмазной обработки деталей типа «шар» из конструкционной керамики // Сверхтв. материалы. – 2000. – № 2. – С. 81–84. Ходаков Г. С., Коровкин В. П., Альтшуллер В. М.
42. Физические основы тонкого шлифования оптического стекла алмазным инструментом // Оптико-механическая промышленность (ОМП). – 1980. – № 9. – С. 46–53. Рогов В. В., Филатов Ю. Д., Ветров А. Г. и др.
43. Новые инструменты и технологии прецизионной обработки деталей из стекла и полистирола // Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – Т. 4: Инструменты и технологические процессы в прецизионной финишной обработке / Под ред. В. В. Рогова. – Киев, 2006. – С. 139–152. Сохань С. В., Стахнив Н. Е.

44. Финишная алмазно-абразивная обработка прецизионных деталей из керамики на основе карбида кремния // Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – Т. 4: Инструменты и технологические процессы в прецизионной финишной обработке / Под ред. В. В. Рогова. – Киев, 2006. – С. 165–181. Филатов Ю. Д., Рогов В. В.
45. Точность формообразования вогнутых сферических поверхностей оптических деталей при полировании инструментом «Аквапол» // Сверхтв. материалы. – 1995. – № 6. – С. 40–45. Травин В.
46. Определение размеров некоторых элементов сферического алмазного инструмента // ОМП. – 1972. – № 6. – С. 38–41. Травин В. В., Красиков Г. С., Воробьев А. Н.
47. Расчет и изготовление сферического алмазного инструмента // ОМП. – 1972. – № 11. – С. 44–48. Рогов В. В.
48. Основы финишной алмазно-абразивной обработки неметаллических деталей в приборостроении: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Киев, 1992. – 39 с. Рогов В. В.
49. Трибохимический механизм процесса полирования кремнеземсодержащего стекла // Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – Т. 4: Инструменты и технологические процессы в прецизионной финишной обработке / Под ред. В. В. Рогова. – Киев, 2006. – Гл. 4. – С. 17–24. Филатов Ю. Д.
50. Наукові основи прецизійного полірування поверхонь деталей з кремнеземвміщуючих матеріалів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Київ, 1996. – 35 с. Филатов Ю. Д., Рогов В. В.
51. Кластерная модель механизма усталостного износа кремнеземсодержащих материалов при полировании // Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – Т. 4: Инструменты и технологические процессы в прецизионной финишной обработке / Под ред. В. В. Рогова. – Киев, 2006. – С. 24–38. Рогов В. В., Н Рублев. Д., Троян А. В. и др.
52. Развитие технологии финишной прецизионной обработки функциональных поверхностей оптических и электронных деталей из синтетического монокорунда (сапфира) // Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – Т. 4: Инструменты и технологические процессы в прецизионной финишной обработке / Под ред. В. В. Рогова. – Киев, 2006. – С. 158–161. Рогов В. В., Рублев Н. Д., Троян А. В. 765. Новая технология прецизионной финишной обработки плоских функциональных поверхностей деталей оптических систем и микроэлектроники из сапфира // Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – Т. 4: Инструменты и технологические процессы в прецизионной финишной обработке / Под ред. В. В. Рогова. – Киев, 2006. – С. 161–165. Сидорко В. И.
54. Наукові основи процесів фінішної алмазно-абразивної обробки природного та синтетичного каменю: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Київ, 2006. – 36 с. Сидорко В. И., Филатов Ю. Д.
55. Новый подход к исследованию закономерностей съема неметаллических материалов при их финишной обработке // Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – Т. 4: Инструменты и технологические процессы в прецизионной финишной обработке / Под ред. В. В. Рогова. – Киев, 2006. – Гл. 4. – С. 232–252. Филатов Ю. Д., Сидорко В. И., Ящук В. П. и др.
56. Закономерности финишной обработки поверхностей деталей из неметаллических материалов // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков, 2001. – № 60. – С. 244–248. Филатов Ю. Д., Сидорко В. И., Крамар В. Г., Скрыбин В. В.
57. Изучение закономерностей формообразования при полировании природных и синтетических алюмосиликатов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонГТУ. – 2001. – Вып. 18. – С. 45–49. Самойлова Л. М., Трефилов В. И., Мильман Ю. В., Назаров Д. Т.
58. Исследование геометрического рельефа поверхности микропорошков АСН и АСНВ // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1980. – № 6. – С. 1–3. Карбань В. И., Кой П., Рогов В. В. и др.
59. Обработка полупроводниковых материалов // Под. ред. Н. В. Новикова и В. Бертольди. – Київ: Наук. думка, 1982. – 256 с. Ohmori H., Nakagawa T
60. . Mirror surface grinding of silicon wafer with electrolytic inprocess dressing // Annals of the CIRP. – 1990. – 39, N 1. – P. 329–332. Aktuelle
61. Projekte der Keramikbearbeitung am IWF der TU-Berlin der Informativer Arbeitskreis «Keramikbearbeitung» / Sprechsaal. – 1990. – 123, N 3. – С. 233–243. Перемышев В. В., Шумяч В. М.
62. О влиянии физико-механических свойств абразивного материала на эксплуатационные показатели // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. – Волжский:

Волжский инж.строит. институт – филиал ВолгГАСА, 2001. – С. 66–67. Бабошкин А. Ф., Пирозерская О. Л.

63. Изменение геометрических параметров абразивных зерен в процессе изнашивания абразивных лент // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. – Волжский: Волжский инж.строит. институт-филиал ВолгГАСА, 2001. – С. 64–66. Кремень З. И., Стратиевский И. Х.

64. Хонингование и суперфиниширование деталей / Под. ред. Л. Н. Филимонова. – 3-е изд. – Л.: Машиностроение, 1988. – 137 с. Арутюнов П. А., Толстых А. Л.

65. Атомно-силовая микроскопия в задачах проектирования приборов микро- и нанoeлектроники. Часть II // Микроелектроника. – 2000. – 29, № 1. – С. 13–22.

66. Литвин О. С., Прокопенко І. В. Вивчення морфології поверхні полікристалічних плівок методом атомно-силової мікроскопії // Наук. вісник Чернівецького університету. Сер. Фізика. Електроніка. – 2001. – Вип. 112. – С. 5–10. Востоков Н. В., Гапонов С. В., Миронов В. Л. и др.

67. Определение эффективной шероховатости поверхности и угловой зависимости коэффициента отражения в рентгеновском диапазоне длин волн по данным атомно-силовой микроскопии // Поверхность. – 2003. – Вып. 1. – С. 107–112. Татаринев А. П., Романец И. И.

68. Субмикрорельеф поверхности пьезокерамики после шлифования и полирования // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. – Волжский: Волжский инж.-строит. институт – филиал ВолгГАСА. – 2002. – С. 185–188.

69. Андрейкив А. Е., Чернец М. В800. . Оценка контактного взаимодействия трущихся деталей машин. – Киев: Наук. думка, 1991. – 160 с. Хрущев М. М., Бабичев М.

70. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 251 с. Горячева И. Г.

71. Механика контактного взаимодействия. – М.: Наука, 2001. – 478 с.

72. Тихоновський А.К., Федько В.О., Сохань С.В. Особливості алмазного шліфування керамічних куль // Інновації молоді в машинобудуванні: Збірка праць Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів / за заг. ред. Данильченка Ю.М., д-ра техн. наук., проф. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – № 1. – 443 с. – С. 387-392.